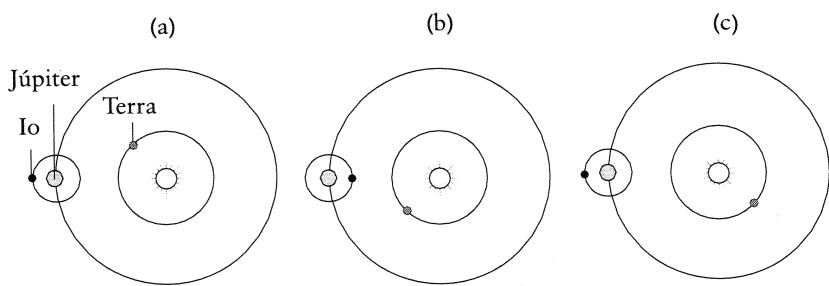


quilômetros antes de chegar à Terra, comparado com a distância quando os dois planetas estavam mais próximos. Se a luz tinha uma velocidade finita, então levaria mais tempo para cobrir essa distância extra, dando a impressão de que Io estava atrasada. Resumindo, Römer afirmou que Io era perfeitamente regular, e sua irregularidade aparente era uma ilusão provocada pelos tempos diferentes que a luz de Io levava para cobrir distâncias diferentes até a Terra.

Para ajudar a entender o que estava acontecendo, imagine que você está próximo de um canhão que é disparado exatamente a cada hora. Você ouve



**Figura 19** Ole Römer mediou a velocidade da luz ao estudar os movimentos da lua Io de Júpiter. Esses diagramas apresentam uma ligeira variação em relação ao método real. No diagrama (a), Io está a ponto de desaparecer por trás de Júpiter; no diagrama (b), Io já completou meia revolução, de modo que está na frente de Júpiter. Enquanto isso, Júpiter quase não se moveu, mas a Terra movimentou-se de modo significativo porque a Terra orbita o Sol 12 vezes mais rapidamente do que Júpiter. Um astrônomo na Terra mede o tempo que se passou entre (a) e (b), ou seja, o tempo que levou para Io completar metade de uma revolução.

No diagrama (c), Io já completou outra meia revolução de volta para onde começou, enquanto a Terra se moveu para uma posição ainda mais afastada de Júpiter. O astrônomo mede o tempo entre (b) e (c), que deveria ser o mesmo que entre (a) e (b), mas de fato se revela significativamente mais longo. A razão para o tempo extra é que a luz de Io leva um pouco mais de tempo para cobrir a distância extra até a Terra no diagrama (c), porque a Terra agora está mais afastada de Júpiter. O atraso no tempo e a distância entre a Terra e Júpiter podem ser usados para estimar a velocidade da luz. (A distância percorrida pela Terra nesses diagramas foi exagerada porque Io orbita Júpiter em menos de dois dias. A posição de Júpiter também mudaria e complicaria a questão.)

o canhão e aciona o canhão dirigindo em uma linha de distância quando um fraco estampido. Se você perceberá ter ouro e não sessenta minutos sessenta minutos entre disparo leva para cobrir perfeitamente regular seis minutos devido à

Depois de passar trinta relativas de Terra e Júpiter, a luz seria 190.000 km/h, mas o que interessa é que a velocidade finita e deduziu um debate fora resolvido,

Contudo Cassini faltado, porque ele não Römer fossem baseados isso Cassini tornou-se traria que ainda preferia a não desistiu e usou sua de Io, em 9 de novembro, em relação ao horário previsto, não disse?", o eclipse de mostrara que estava certa da velocidade da luz.

A previsão do eclipse era certa. E, no entanto, considerando, fatores além da posição científica. Cassini ocupava mais do que ele, e assim, se manter vivo, ele considerava Römer de que a luz tinha

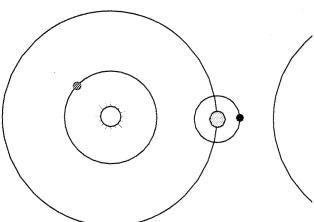
A previsão do eclipse deviria ter resolvido a questão de uma vez por todas. E, no entanto, como viemos no caso do debate sobre o Sol e a Terra no centro, fatores além da pura lógica e da razão as vezes influenciam o consenso científico. Cassini ocupava uma posição mais elevada que Römer e viveu mais do que ele, e assim, através de numerosas polêmicas e simplesmente por se manter vivo, ele conseguiu mudar as opiniões contra o argumento de Römer de que a luz tinha uma velocidade finita. Algumas décadas depois,

dida da velocidade da luz.

Contudo Cassini ficou aborrecido quando Roemer anunciou seu resultado, porque ele não recebeu reconhecimento, embora os cálculos de Roemer fossem baseados, em sua maior parte, nas suas observações. Por isso Cassini tornou-se um duro crítico de Roemer e um porta-voz da maioria que acreditava que a teoria de que a velocidade da luz finita era impossível. Roemer não desistiu e usou sua velocidade da luz finita para prever que um eclipse parcial de Júpiter ocorreria em 9 de novembro de 1676, acontecendo dez minutos antes do que realmente ocorreu. Num caso clássico de "eu sabia que ia acontecer", Roemer era o vencedor.

Depois de passar três anos analisando as observações de Io e as possibilidades relativas de Terra e Júpiter, Roemer conseguiu estimar que a velocidade da luz seria 190.000 km/h. De fato, o valor verificado é quase 300.000 km/s, dade finita e deduziu um valor que não era muito diferente impreciso. O debate fora resolvido, afinal.

volugao de volta para onde come-  
minda mas afastada de Júpiter. O  
ser o mesmo que entre (a) e (b),  
razão para o tempo extra que a  
distância extra que a Terra no  
de Júpiter. O atraso no tempo e a  
estimar a velocidade da luz. (A  
xagerada por que lo orbita Júpiter  
mudaria e complicaria a questão).



(c)

ecendo, imagine que você está mente a cada hora. Você ouve

radô com a distância quan-

do a luz tinha uma velocidade

essa distância extra, dando

lindo, Roemer afirmou que Lo-

ade aparente era uma ilusão

de levava para cobrir dis-

contudo, Cassini e seus colegas foram substituídos por uma nova geração de cientistas, que examinaram a conclusão de Römer de modo imparcial, fizeram seus próprios testes e a aceitaram.

Uma vez estabelecido que a velocidade da luz era finita, os cientistas se voltaram para outro mistério em relação a sua propagação: qual era o meio responsável pelo deslocamento da luz? Os cientistas sabiam que o som pode viajar em uma variedade de meios — os seres humanos, quando falam, en- viam ondas sonoras através de um meio gasoso, o ar; as baleias cantam umas para as outras usando a água líquida como meio, e podemos ouvir o bater dos nossos dentes através do meio sólido dos nossos ossos entre os dentes e os ouvidos. A luz também pode viajar através de gases, líquidos e sólidos, como o ar, a água e o vidro, mas havia uma diferença fundamental entre luz e som, como fora demonstrado por Otto von Guericke, o burgomestre de Magdenburgo que realizara uma série de experiências famosas em 1657.

Von Guericke tinha inventado a primeira bomba de vácuo e conseguiu explorar as estranhas propriedades do vácuo. Em uma experiência, ele colocou dois grandes hemisférios de latão unidos frente a frente e sugou o ar de dentro deles de modo que se comportassem como duas ventosas excepcionalmente poderosas. Então, numa maravilhosa exibição de espetáculo científico, ele demonstrou que dois conjuntos de oito cavalos não eram capazes de separar os dois hemisférios.

Numa experiência ainda mais elegante, Von Guericke retirou o ar de uma jarra de vidro contendo uma campainha. À medida que o ar era sugado, a platéia não conseguia mais ouvir a campainha tocando, mas podia ver o martelinho golpeando a sineta. Estava claro, portanto, que o som não podia viajar através do vácuo. Ao mesmo tempo, a experiência mostrou que a luz podia viajar pelo vácuo, porque a campainha não desapareceu e o interior da jarra não ficou escuro. De modo estranhíssimo, se a luz podia viajar através do vácuo então alguma coisa podia viajar através do nada.

Confrontados com esse aparente paradoxo, os cientistas começaram a se perguntar se o vácuo era de fato vazio. O ar fora retirado da jarra, mas talvez ainda existisse alguma coisa lá dentro, algo que fornecera um meio para a transmissão da luz. No século XIX, os cientistas tinham proposto que todo o universo era permeado por uma substância que chamaram de éter

*luminescente*, que, de alguma  
luz. Essa substância hipoteticamente  
notáveis, como lembrou o

— Agora, o que é o éter lúbrico? —  
densa do que o ar — mi-  
Podemos ter alguma idéia  
real, com grande rigidez  
para vibrar 400 bilhões  
densidade que não opõe  
que através dela.

Em outras palavras, o éter insubstancial. Era também Estava em toda parte ao 1 porque ninguém jamais c disso, Albert Michelson, c Física, achava que podia p

Os pais judeus de Michelangelo, em 1854, quando ele tinha 18 anos, haviam se mudado para os Estados Unidos, onde se graduou em óptica. O que o levou a se interessar por óptica e óptica teórica e mais ao conhecimento de que saberá o suficiente para ser um grande físico. Michelangelo, de modo integral, em 1873, que a velocidade da luz era preciso do que qualquer pessoa poderia imaginar.

Então, em 1880, Mic  
que provasse a existência  
dia um único raio de luz  
raio viajava na mesma dir

ratio viajava na mesma direção do movimento da Terra através do espaço, dia um único raios de luz em dois raios separados, perpendiculars. Um que provasse a existência do etérion condutor da luz. Seu equipamento divulgado, em 1880, Michelson projetou uma experiência que ele torcia

preciso do que qualquer estimação anterior. que a velocidade da luz de  $299.910 \pm 50$  km/s, o que era vinte vezes mais tempo integral, e, em 1878, com apenas 25 anos de idade, ele determinou Michelson, de modo inteligente, passou a dedicar-se a pesquisas ópticas em que sabia o suficiente para ser de alguma utilidade ao seu país". em que mais ao conhecimento da artilleria naval, pode chegar uma ocasião tráficas e dos Unidos, onde se graduou em 25º lugar em conhecimentos navais e da Academia: "Se no futuro a seguirme observação do superintendente metro em óptica. O que provoco a seguinte observação do superintendente dos Unidos, quando ele tinha apenas dois anos de idade. Ele passou a infância em 1854, quando ele tinha apenas dois anos de idade. Ele passou a infância em São Francisco antes de entrar para a Academia Naval dos Estados Unidos de vaca e conseguindo das pesquisas na Prússia

Os pais judeus de Michelson fugido das perseguições na Prússia física, achava que podia provar a sua existência. disso, Albert Michelson, o primeiro americano a ganhar o prêmio Nobel de Física em 1904, quando ao nosso redor, e no entanto era difícil de identificar insubstancial. Era também transparente, sem atrito e quimicamente inerte. Em outras palavras, o etérion era incrivelmente forte e no entanto estranhamente

que através dela.

denisidade que não opõe a menor resistência a nenhum corpo que se desloca. para vibrar 400 bilhões de vezes por segundo; e, no entanto, ser de uma real, com grande rigidez em comparação com sua densidade: pode ser feita podemos ter alguma ideia de seus limites. Acreditações que é uma coisa densa do que o ar — milhões e milhões de vezes menos densa do que o ar. Agora, o que é o etérion? É uma matéria prodigiosamente menos

notáveis, como lembrou o grande cientista vitoriano Lord Kelvin:

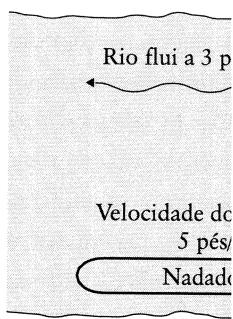
luminosidade, que, de alguma forma, agia como meio para o transporte da luz. Essa substância hipotética necessariamente teria algumas propriedades notáveis, como lembrou o grande cientista vitoriano Lord Kelvin:

enquanto o outro se movia numa direção em ângulo reto com o primeiro. Ambos percorriam uma distância igual, eram refletidos por espelhos e então voltavam a se combinar num único feixe. Ao se combinarem, sofriam um processo conhecido como interferência, que permitia que Michelson comparasse os dois raios de luz e identificasse qualquer discrepância nos tempos de percurso.

Michelson sabia que a Terra viaja a aproximadamente 100.000 km/h na sua trajetória em torno do Sol, o que presumivelmente significava que ela passaria através do éter com essa velocidade. E, como se supunha que o éter fosse um meio estável, que permeava o universo, a passagem da Terra através do espaço deveria criar uma espécie de *vento de éter*. Isso seria semelhante ao falso vento que você sente se andar num carro sem capota, em alta velocidade, num dia calmo — não está na verdade ventando, mas parece que está devido ao seu movimento. Portanto, se a luz fosse transportada no éter e por meio dele, sua velocidade seria afetada pelo vento de éter. Mais especificamente, na experiência de Michelson um raio de luz estaria viajando ao vento do éter e contra ele, e assim deveria ter sua velocidade afetada de modo significativo enquanto o outro raio estaria atravessando o vento de éter lateralmente e sua velocidade seria menos afetada. Se os tempos de percurso dos dois raios fossem diferentes, então Michelson conseguiria usar essa discrepância como uma forte evidência a favor da existência do éter.

A experiência para detectar o vento de éter era tão complexa que Michelson explicou seus termos na forma de um enigma.

Suponha que temos um rio com 100 pés (30 metros) de largura e dois nadadores que nadam com a mesma velocidade, digamos 5 pés por segundo (1,5 metro por segundo). O rio flui com uma corrente estável de 3 pés (90 centímetros por segundo). Os nadadores disputam do seguinte modo: ambos partem de um mesmo ponto em uma das margens. Um deles nada diretamente através do rio para o ponto mais próximo da margem oposta, então vira e nada de volta. O outro fica num dos lados do rio, nadando rio acima por uma distância (medida ao longo da margem) igual à largura do rio, e então volta ao ponto de partida. Qual deles chega primeiro? [Ver a solução na figura 20.]



**Figura 20** Albert Michelson  
cia do éter. Os dois nadado-  
vendo-se em direções perpe-  
partida. Um deles nada pri-  
nada através da corrente —  
o vento do éter enquanto o  
vencedor de uma corrida en-  
dores que podem nadar co-  
nadador A vai rio acima nu-  
corrente outros 100 pés, en-  
rendo dois trechos de 100

O tempo que o nadador leva para nadar 200 pés é de 62,5 segundos.

O nadador B, ao atravessar correnteza. O teorema de Pitágoras terá um componente rio acidental transversal de 4 pés/segundos e então leva outros 200 segundos para nadar 200 m.

Embora ambos os nadadores, o nadador que cruza a correnteza, deslocasse através do vento, que se deslocasse primeiro, a experiência para verificar se

Embora ambos os nadadores possam nadar com a mesma velocidade em água para a direita, o nadador que cruza a correnteza vence a corrida contra o nadador que vai a favor e da, o nadador que nadar contra a correnteza perde a corrida. Michaelson suspeitava de que um raião de deslocasse através a correnteza. Por isso, Michaelson suspeitava de que um raião de deslocasse através do vento do oeste teria um tempo de viagem mais curto do que um raião que se deslocasse primeiro a favor e depois contra o vento do oeste. Ele projetou uma experiência para verificar se isso acontecia.

O nadador B, ao atravessar o rio, tem que nadar num ângulo para compensar a correnteza. O teorema de Pitágoras nos diz que, se ele nadar a  $5 \text{ pés/s}$  no ângulo correto, terá um componenteiro acima de  $3 \text{ pés/s}$  que cancela o efeito da correnteza. O resultado é que ele nadará  $4 \text{ pés/s}$ . Com isso ele nadará os primeiros 100 pés em apenas 25 segundos e entrará leva outros 25 segundos para voltar, levando um tempo total de 50 segundos.

O tempo que o nadador A leva para ir *trio acima e entao trio abaixo e facil de analisar*. Nadaando a favor da correnteza, o nadador tem uma velocidade total de 8 pés/s (5 + 3 pés/s), assim ele leva 12,5 segundos para percorrer os 100 pés. Ao voltar contra a correnteza, ele nada com uma velocidade de apenas 2 pés/s (5-3 pés/s), assim ele leva 50 segundos para percorrer este outro trecho de 100 pés. Portanto, seu tempo total para nadar os 200 pés é de 62,5 segundos.

**Figura 20** Albert Michelson usou este problema de matemática para explicar sua experiência do efeito Michelson-Morley. Os dois nadadores desempenham o mesmo papel de dois raios de luz, mesmo se em direções perpendiculares entre si. Ambos, ao mesmo ponto de partida, nadam para o primeiro a favor e depois contra a correnteza, enquanto o outro nadava através da correnteza — exatamente como um raião de luz viajaria juntamente com a correnteza. O vento do leste enguianta o outro a atravesse. O objetivo do problema é determinar o tempo que uma correnteza de determinada velocidade levaria para atravessar um determinado intervalo de distância, se o nadador nadasse com uma velocidade constante de 5 pés por segundo na água parada. O nadador A vai a um ponto 30 metros a jusante e o nadador B a jusante a 30 metros. O tempo que levaria para o nadador A nadar 100 pés é o mesmo que o tempo que levaria para o nadador B nadar 100 pés, quando os dois nadadores nadarem na água parada. O tempo que levaria para o nadador A nadar 100 pés é o mesmo que o tempo que levaria para o nadador B nadar 100 pés, quando os dois nadadores nadarem na água parada, tanto que a velocidade da correnteza é de 3 pés/s.

The diagram shows a river flowing from right to left with a speed of  $3 \text{ pés/s}$ . A swimmer, Nadador B, is swimming upstream with a speed of  $3 \text{ pés/s}$  relative to the water. The swimmer's total speed relative to the riverbank is  $4 \text{ pés/s}$  (upstream). Nadador A is swimming downstream with a speed of  $5 \text{ pés/s}$  relative to the water. The swimmer's total speed relative to the riverbank is  $5 \text{ pés/s}$  (downstream). The riverbank is labeled "Partida" at the top and "Rio Flu" at the bottom.

Michelson investiu nas melhores fontes de luz e espelhos disponíveis para sua experiência e tomou todas as precauções possíveis na montagem do aparelho. Tudo foi cuidadosamente alinhado, nivelado e polido. Para aumentar a sensibilidade de seu equipamento e minimizar os erros, ele fez a montagem principal flutuar num grande banho de mercúrio, isolando-a, portanto, de fatores externos, como os tremores provocados por passos distantes. O objetivo de sua experiência era provar a existência do éter, e Michelson fez tudo o que podia para maximizar a chance de sua detecção. E por esse motivo ficou atônito com a completa e total incapacidade de detectar qualquer diferença nos tempos de chegada dos dois raios perpendiculares. Não havia o menor sinal de éter. Era um resultado chocante.

Desesperado para descobrir o que saíra errado, Michelson recrutou o químico Edward Morley. Juntos, eles reconstruíram o aparelho, aperfeiçoando cada peça de equipamento para tornar a experiência ainda mais sensível, e então voltaram a fazer as medições. Finalmente, em 1887, depois de passarem sete anos repetindo a experiência, eles publicaram seus resultados definitivos. Não havia sinal de éter. Portanto, eles foram forçados a concluir que o éter não existia.

Levando em conta seu conjunto ridículo de propriedades — supunha-se que fosse a substância menos densa e mais rígida do universo —, não devia causar surpresa que o éter fosse uma ficção. Não obstante, os cientistas o abandonaram com grande relutância, porque fora o único meio concebível para explicar como a luz era transmitida. Até mesmo Michelson teve problemas para aceitar sua própria conclusão. Ele certa vez se referiu ao “velho e amado éter, que agora foi abandonado, embora eu, pessoalmente, ainda me agarre um pouco a ele”.

A crise da não-existência do éter foi aumentada porque se supunha que ele fosse responsável pelo transporte dos campos elétricos e magnéticos, assim como da luz. A terrível situação foi bem resumida pelo escritor científico Banesh Hoffmann:

Primeiro tínhamos o éter luminescente  
Depois tínhamos o éter eletromagnético,  
E agora não temos nenhum dos dois.

Assim, no fim do sécu  
Ironicamente, ele tinha  
cias bem-sucedidas, rela  
taria de uma experiênci  
a existência do éter, nã  
que a luz, de algum mo  
ço desprovido de qualq

A conquista de Michaelson, especializado e anos de estudo solitário, sem saber da existência de um campo magnético, não existia, mas baseado na teoria de Albert Einstein.

As expe

As proezas juvenis de Eir volvida brotaram em gra do ao seu redor. Ao long ele nunca parou de se ma Mesmo na idade de cinco namento de uma bússola invisível que puxava a ag natureza do magnetismo insaciável de Einstein par

Como Einstein disse especiais. Sou apenas ap. mais importante é não p. pria razão de existir. Não mos os mistérios da eterni Já é bastante se alguém te tório a cada dia". O prêr. vista: "Acho que os físicocem e mantêm sua curios

As proezas juvenis de Einstein e mais tarde sua genialidade plenamente desenhada brotaram em grande parte de sua imensa curiosidade a respeito do mundo ao seu redor. Ao longo de sua carreira prolífica, revolucionária e visonária, ele nunca parou de se maravilhar com as leis subjacentes que regem o universo. Mesmo na idade de cinco anos, Einstein ficou fascinado pelo misterioso fundamento de uma bissola que lhe fora dada por seu pai. O que seria a força invisível que puxava a agulha e por que ela apontava sempre para o norte? A natureza do magnetismo o fascinou pela vida inteira, o que era tipico do apetite insaciável de Einstein para explorar fenômenos aparentemente triviais.

Como Einstein disse ao seu biógrafo Carl Seelig, "eu não posso talentos especiais. Sou apenas apaixonadamente curioso". Ele também escreveu: "O mais importante é não parar de fazer perguntas. A curiosidade tem sua própria razão de existir. Não podemos deixar de nos admirar quando contemplamos os mistérios da eternidade, da vida, da maravilhosa estrutura da realidade. Isso é bastante se alguma tentar compreender apenas um pouquinho desse mistério a cada dia". O premio Nobel Líslidor Isaac Rabi referiu-se esse ponto de vista: "Acho que os físicos são os Peter Pan da raga humana. Eles nunca crescem e mantêm sua curiosidade".

## As experiências mentais de Einstein

Assim, no fim do século XIX, Michelson provaria que o eter não existia. Dromicamente, ele tinha construído sua carreira sobre uma série de experiências bem-sucedidas, relacionadas com a óptica, mas seu maior triunfo resultaria de uma experiência fracassada. Seu objetivo, o tempo todo, fora provar que a luz, de algum modo, podia viajar através do vácuo — através de espaços existenciais do etérion, não a sua ausência. Os físicos agora tinham que aceitar a existência do etérion, mas só depois de prová-lo. Michelson experimentou e specializou-se em esforços. Mais ou menos na mesma época, um jovem solitário, sem saber da condutista de Michelson, também conciliou o etérion existia, mas baseado em argumentos puramente teóricos. Seu nome era Albert Einstein.

Nesse aspecto, Einstein tinha muito em comum com Galileu. Einstein escreveu uma vez: "Estamos na situação de uma criança pequena que entra em uma imensa biblioteca cujas paredes estão cobertas até o teto com livros em muitos idiomas diferentes". Galileu fez uma analogia semelhante, mas ele condensou toda a biblioteca da natureza em um único grande livro e uma única linguagem que sua curiosidade o compelia a decifrar: "Ele está escrito na linguagem da matemática e as letras são triângulos, círculos e outras figuras geométricas, sem as quais é humanamente impossível entender uma única palavra. E sem elas ficamos vagando por um labirinto escuro".

Galileu e Einstein também estão unidos por um interesse comum no princípio da relatividade. Galileu descobriu o princípio da relatividade, mas foi Einstein quem o explorou completamente. Numa forma simples, a relatividade de Galileu diz que todo movimento é relativo, o que significa que é impossível saber se estamos em movimento sem recorrer a uma estrutura de referência externa. Galileu declarou vividamente o que ele queria dizer por relatividade no *Diálogo*:

Tranke-se com um amigo na cabine principal sob o convés de um navio e leve com você algumas moscas, borboletas e outros pequenos animais voadores. Tenha também um aquário com peixes dentro e pendure uma garrafa que goteje sobre uma bacia embaixo dela. Com o navio parado, observe cuidadosamente como os pequenos animais voam com igual velocidade em todos os lados da cabine; como os peixes nadam indiferentemente em todas as direções e como as gotas caem na bacia embaixo. E, ao jogar alguma coisa para seu amigo, você não precisa atirá-la com mais força em uma direção ou na outra, a distância é igual. Se saltar com os pés unidos, vai percorrer distâncias iguais em todas as direções.

Quando tiver observado tudo isso com cuidado... faça com que o navio navegue com a velocidade que desejar, desde que o movimento seja uniforme e não flutuante desse modo ou daquele. Vai descobrir que não há nenhuma mudança nos efeitos citados, nem poderá dizer, a partir deles, se o navio está se movendo ou parado.

Em outras palavras, enquanto estiver se movendo a uma velocidade constante e numa linha reta, não há nada que possa fazer para medir a velocidade

de deslocamento, ou p tece porque tudo ao se movimentos (por exei nuam inalterados, a de bém o cenário de Galil de modo que você esttar algum movimento referência. Se você se i pões nos ouvidos e os c me, será muito difícil c está parado na estação,

Essa foi uma das n vencer os astrônomos c críticos anticopernican redor do Sol porque se ou como o solo sende j ce. Contudo, o princípio enorme velocidade da atmosfera, também se i Uma Terra móvel é efet se ela fosse estática.

De modo geral, a t pode afirmar se estamos imóveis. Isso é verdade olhos e os ouvidos tam quer outro modo.

Sem saber que Mich tia, Einstein usou o pr explorar a possível exis de galileana no contex como *experimento geda* se de uma experiência p do físico, em geral porq realizar no mundo real.

Sem saber que Michelson e Morley tinham provado que o eter não existe-  
tia, Einstein usou o princípio da relatividade de Galileu como base para  
explorar a possibilidade existencial do eter. Em especial, ele recorreu à relativida-  
de galileana no contexto de um experimento mental, também conhecido  
como *experimento gedanken* (da palavra alema “pensamento”). Trata-  
se de uma experiência puramente imaginária que acontece apenas na cabeça  
do físico, em geral porque envolve um procedimento que não é prático de se  
realizar no mundo real. Embora seja uma construção puramente teórica, um

De modo geral, a teoria da relatividade de Galileu declara que não se pode afirmar se estamos nos movendo com rapidez, lentamente ou se estamos imóveis. Isto é verdade se vocé estiver isolado na Terra, ou num trem com os olhos e os ouvidos tampados, ou isolado de uma referência externa de dual-

de deslocamento, ou para dirigir-se para a realidade em movimento. Isto acontece porque tudo ao seu redor se move com a mesma velocidade, e todos os movimentos (por exemplo, garrafas gotejando, borboletas voando) continuam imalterados, a despeito de voces estarem movimento ou parado. Tanto bem o cenário de Galileu acontece "na cabine principal, debaixo do convés", de modo que voces estarem isolado, o que elimina qualquer esperança de detecção de modos que voces estarem movimento relativo recorrendo-se a uma estrutura extrema como referência. Se voces se isolam de modo semelhante, ficando sentado com todos os ouvidos e os olhos fechados, dentro de um trem numa linha unifilar, serão muito difícil dizer se o trem está correndo a 100 km/h ou se ainda está parado na estação, o que é outra demonstração da relatividade galileana. Essa foi uma das maiores descobertas de Galileu, porque ajudou a confirmar os astrolabios gregos de que a Terra de fato gira ao redor do Sol. Os criticos anticopernicanos argumentavam que a Terra não podia se mover ao redor do Sol porque sentíam que a Terra não podia se mover ao redor do Sol. Os que eram de Galileu, acreditavam que a Terra é só um vento constante que move o solo quando nosso pé, o que claramente não acontece. Contudo, o princípio da relatividade de Galileu diz que não sentimos a enorme velocidade da Terra através do espaço porque tudo, do solo à atmosfera, também se move pelo espaço com a mesma velocidade que nós.

experimento mental pode, com freqüência, levar a um profundo entendimento do mundo real.

Em uma experiência mental realizada em 1896, quando tinha apenas 16 anos de idade, Einstein imaginou o que aconteceria se ele pudesse viajar com a velocidade da luz enquanto segurava um espelho diante dele. Particularmente, imaginava se seria capaz de ver o próprio reflexo. A teoria vitoriana do éter o concebia como uma substância estática que permeava todo o universo. A luz era supostamente transportada pelo éter, assim isso implicava que ela se deslocava com a velocidade da luz (300.000 km/s) em relação ao éter. Na experiência mental de Einstein, ele, seu espelho e seu rosto, também viajavam pelo éter com a velocidade da luz. Portanto, a luz deveria deixar o rosto de Einstein e tentar viajar até o espelho em sua mão, mas nunca conseguiria deixar o seu rosto, e muito menos alcançar o espelho, porque tudo se movia com a velocidade da luz. E, se a luz não podia alcançar o espelho, então ela não seria refletida de volta e, consequentemente, Einstein não seria capaz de ver o próprio reflexo.

Esse cenário imaginário era chocante porque desafiava completamente o princípio da relatividade de Galileu, segundo o qual uma pessoa que se deslocasse a uma velocidade constante não conseguiria determinar se estava se movendo rapidamente, lentamente, para frente ou para trás — ou até se estava de fato se movendo. A experiência mental de Einstein implicava que ele saberia quando estava se movendo com a velocidade da luz porque o seu reflexo desapareceria.

O menino prodígio tinha feito uma experiência imaginária baseado num universo cheio de éter, e o resultado era paradoxal, porque contradizia o princípio de relatividade de Galileu. A experiência mental de Einstein pode ser encenada no cenário de Galileu, sob o convés do navio: o marinheiro saberia se seu navio estava se movendo com a velocidade da luz porque seu reflexo desapareceria. Contudo Galileu tinha declarado com firmeza que o marinheiro não conseguiria perceber se o navio estava em movimento.

Alguma coisa tinha que ceder. Ou a relatividade de Galileu estava errada, ou a experiência mental de Einstein tinha uma falha fundamental. No final, Einstein percebeu que sua experiência falhara porque era baseada num universo cheio de éter. Para resolver o paradoxo, concluiu que a luz não

viaja a uma velocidade finita pelo éter e que o éter nem mente isso que Michelson

Pode-se desconfiar de especialmente se a física riências reais, com equipa riências mentais estão na e é por isso que a experie te. Não obstante, a experie de sua mente jovem e, o as implicações de um un mos da velocidade da luz

A noção vitoriana do texto adequado para o que a cidade da luz. Todos aceitam a constante,  $300.000 \text{ km/s}$  e em relação ao meio no qual se sentindo no universo vitoriano tinham mostrado que não é meio no qual viajar, o que é a cidade da luz? A velocidade

Einstein pensou na questão: se a luz chega a um observador, ela provavelmente se desloca a uma velocidade constante. Ele chegou a uma conclusão: a velocidade da luz é constante, independentemente da velocidade do observador. Ele também chegou a uma conclusão: a velocidade da luz é constante, independentemente da velocidade do observador.

Imagine um garoto com a velocidade de 40 m/s. Vamos distante do garoto. Ele dirá:

Imagiñe um garoto com uma zarrabatana que sempre lê angas ervilhas com a velocidade de 40 m/s. Voucê está encostado num muro, num ponto da rua a velocidade do gato. Ele dispara a zarrabatana em sua direção de modo que a distante do garoto.

Einstein pensou na questão intermediária nos anos seguintes. Por fim chegou a uma solução para o problema, mas uma solução que dependeria muito da intuição. A primeira vista, sua solução parecia absurda, e no entanto depois ficaria provado que estava certíssimo. De acordo com Einstein, a luz se desloca a uma velocidade constante de 300.000 km/s em relação ao observador. Em outras palavras, não importa quais as circunstâncias ou como a luz seja emitida, cada um de nós perceberá a mesma velocidade 299.792.458 m/s). Isso parece absurdo porque contraria a nossa experiência diária das velocidades dos objetos comuns.

A noção vitória da éter forá muito confortante, porque formaça um con-  
texto adequado para o que os cientistas queriam dizer quando falavam na velo-  
cidade da luz. Todos acertavam que a luz se deslocava com uma velocidade  
constante, 300.000 km/s todos presunham que isso significava 300.000 km/s  
em realágao ao méio no qual se deslocava, que se julgava ser o éter. Tudo fazia  
sentido no universo vitóriano cheio de éter. Mas Michelson, Morley e Einsten  
tinhaam mostrado que não havia éter. Portanto, se a luz não precisava de um  
méio no qual viajar, o que os cientistas queriam dizer quando falavam em velo-  
cidade da luz? A velocidade da luz era 300.000 km/s, mas em realágao ao que?

Pode-se desconfiar do experimento mental um tanto tortuoso de Einstein, especialmente se a física é vista como uma disciplina que depende de explicações reais, com equipamentos verdadeiros e medidores reais. De fato, explicações matemáticas estão nas fronteiras da física e não são totalmente conclusivas, e por isso que a experiência real de Michelson e Morley foi tão importante. Não obstante, a experiência imaginária de Einstein demonstraria o britão de sua mente jovem, o que é mais importante, o que nos rumo para abordar as implicações de um universo desprovido de etér e seu significado em termos da velocidade da luz.

viaja a uma velocidade fixa em rela o ao eter, que a liz não e transportada pelo eter e que o eter nem mesmo exista. Sem que ele soubesse, era exactamente isso que Michelson e Morley ja tinham descoberto.

ervilha deixa o cano com a velocidade de 40 m/s, cruza o espaço intermedio a 40 m/s e, quando acerta, na sua testa, certamente você sente como se ela estivesse se movendo a 40 m/s. Se o garoto montar na bicicleta e correr em sua direção a 10 m/s e disparar a zarabatana de novo, a ervilha ainda deixará o cano a 40 m/s, mas atravessará a distância a 50 m/s e o atingirá à mesma velocidade. A velocidade extra se deve ao fato de a ervilha ser lançada da bicicleta em movimento. E, se você correr na direção do garoto a 4 m/s a situação ficará ainda pior, porque a ervilha o atingirá agora movendo-se a 54 m/s. Em resumo, você (o observador) perceberá uma velocidade diferente das ervilhas dependendo de uma variedade de fatores.

Einstein acreditava que a luz se comportava de um modo diferente. Quando o garoto não está andando em sua bicicleta, então a luz do farolete o atinge com a velocidade de 299.792.458 m/s. Quando ele pedala a bicicleta em sua direção a 10 m/s a luz do farolete da bicicleta continua a atingi-lo com a velocidade de 299.792.458 m/s. E, mesmo se você andar em direção à bicicleta enquanto esta se move em sua direção, a luz ainda continuará a atingi-lo com a velocidade de 299.792.458 m/s. A luz, insistia Einstein, se desloca com uma velocidade constante em relação ao observador. Quem quer que esteja medindo a velocidade da luz, sempre encontrará o mesmo resultado, em qualquer situação. Experiências demonstrariam mais tarde que Einstein estava correto. A distinção entre o comportamento da luz e de outras coisas, tais como ervilhas, está exemplificada abaixo

Sua visão da velocidade das ervilhas	Sua visão da velocidade da luz
Ninguém se move	40 m/s
Menino pedala em sua direção a 10 m/s	299.792.458 m/s
...e você caminha em direção ao garoto a 4 m/s	299.792.458 m/s

Einstein estava conveniente para o observador p sua experiência imaginária de acerto com o observador em sua experiência da luz e, não obstante, a velocidade da luz, porque a luz deixaria Einstein com a mesma velocidade, o que Exatamente a mesma coisa: espelho do banheiro — a luz seria refletida de volta con Em outras palavras, ao pr relação ao observador, ent movendo com a velocidade é exatamente o que o princípio que você tenha a mesma ex

A constância da velocidade da luz é uma conclusão notável e continua a ser verdadeira. Einstein ainda era apenas um adolescente da juventude que explorou o público e abalaria o mundo quanto trabalhava em particular

De modo decisivo, ao longo de sua energia natural, sua criação e educação de seu colégio. Ele disse que seu professor, que era um homem de aprendizado é a minha formação, incluindo o eminentemente genial e classificá-lo como "um caco". Weber, lhe disse: "Você é um gênio. Mas tem um grande defeito: Einstein se devia, em parte, a sua paixão por física, o que era o motivo de Weber, em vez de Herr Professor



Como resultado desse choque de personalidades, Weber não escreveu a carta de recomendação que Einstein precisava para seguir uma carreira acadêmica. E, como consequência disso, passou os sete anos seguintes à sua graduação trabalhando como funcionário no escritório de patentes em Berna, na Suíça. Mas isso acabou não sendo um grande prejuízo. No lugar de ser tolhido pelas teorias aceitas, ensinadas nas grandes universidades, Einstein agora podia se sentar em seu escritório e pensar nas implicações de suas experiências mentais da adolescência — exatamente o tipo de reflexões especulativas que Herr Professor Weber teria censurado. De início, o prosaico trabalho de escritório de Einstein, como “especialista técnico de terceira classe em período de experiência”, permitia que ele cumprisse com todas as suas responsabilidades no exame de patentes em apenas algumas horas de cada dia, deixando bastante tempo livre para conduzir suas pesquisas pessoais. Se tivesse se tornado um acadêmico em uma universidade, ele teria desperdiçado dia após dia lidando com política institucional, tarefas administrativas intermináveis e pesadas responsabilidades como professor. Em carta a um amigo, ele descreveu seu escritório como “aquele retiro secular onde desenvolvi minhas idéias mais belas”.

Esses anos como funcionário de patentes se mostrariam um dos períodos mais profícos de sua vida intelectual. Ao mesmo tempo, foi uma época bastante emotiva para o gênio em maturação. Em 1902 Einstein sofreu o choque mais profundo de toda a sua vida, quando seu pai contraiu uma doença fatal. Em seu leito de morte, Hermann Einstein deu a Albert sua permissão para que se casasse com Mileva Marié, sem saber que o casal já tinha uma filha, Lieserl. De fato, os historiadores também desconheciam a filha de Albert e Mileva até terem acesso à correspondência pessoal de Einstein no final da década de 1980. Descobriu-se que Mileva tinha retornado à sua nativa Sérvia para dar à luz, e assim que soube do nascimento de sua filha Einstein escreveu para Mileva: “Ela tem saúde e já chorar adequadamente? Que tipo de olhinhos ela tem? Com qual de nós se parece mais? Quem a está amamentando? Ela tem fome? Já tem cabelos? Eu a amo tanto e nem a conheço ainda!... Ela certamente já pode chorar,

mas só vai aprender a rir Albert nunca ouviria se correr o risco da vergonha Lieserl foi oferecida para

Albert e Mileva se casaram no ano seguinte. Einstein finalmente convidou. Sua pesquisa teórica e os trabalhos, ele analisou o browniano e, a partir da teoria de que a matéria trabalhou, ele mostrou que o fotoelétrico podia ser teoria quântica. Não é de se surpreender que o prêmio Nobel.

O terceiro trabalho, as idéias de Einstein da constância em relação a mentos para a física e o universo. Não era tanto tão importante, mas as coisas eram atordoantes até mesmo, acabara de completado períodos de encontro com sua teoria da relatividade, quando a teoria comigo, fui assolado por tosse, costumava passar semanas naquela época, ainda não primeiros choques com tais

Albert e Mileva se casaram em 1903 e seu primeiro filho, Hans Albert, nasceu no ano seguinte. Em 1905, enquanto equilibrava as responsabilidades da paternidade com suas obrigações de funcionário das patentes, Einstein finalmente conseguiu um período de férias a respeito do universo. Sua pesquisa teórica chegou ao clímax numa explosão de trabalho. Einstein finalmente conseguiu a concretizar suas ideias a respeito do universo. Ele analisou o fenômeno conhecido como movimento de rotina de gás, apresentou um brilhante argumento em apoio a teoria de que a matéria é formada por átomos e moléculas. Em outro trabalho, ele mostrou que o conhecimento de fisionomia dos cíntificos publicados no período *Annalen der Physik*. Num dos trabalhos, ele analisou o fenômeno conhecido como movimento rotativo, que é de admirar que esse trabalho tenha dado a Einstein uma premiação Nobel.

O terceiro trabalho, entretanto, era ainda mais brilhante. Ele resumia as ideias de Einstein da década anterior sobre a velocidade da luz e sua constância em relação ao observador. O trabalho estabelecia novos fundamentos para a física e finalmente assentaria as regras para o estudo do universo. Não era tanto o caráter constante da velocidade da luz que era importante, mas as consequências que Einstein previa. As repercussões eram atordoadas até mesmo para Einstein. Ele ainda era um homem jovem, acabara de completar 26 anos quando publicou sua pesquisa e expreu como sua teoria da relatividade especial. "Devo confessar que bem no princípio, fui assolado por todo tipo de conflitos nervosos. Quando jove, eu costumava passar semanas num estado de confusão, como alguém que, em mim, fui assolado a teoria da relatividade especial. 'Devo confessar que fiquei comigo a germinar em meu período de estudos de relatividade especial',

mas so viu aprender a ir muito depois. Ai está uma verdade profunda",

Albert nunca ouviu sua filha chorar ou a ver a tristeza. O casal não podia correr o risco da vergonha social que significava ter uma filha ilegítima, e Liselet foi oferecida para adotá-la na Suécia.

Albert e Mileva se casaram em 1903 e seu primeiro filho, Hans Albert, nasceu no ano seguinte. Em 1905, enquanto equilibrava as responsabilidades da paternidade com suas obrigações de funcionário das patentes, Einstein finalmente conseguiu um período de férias a respeito do universo. Sua pesquisa teórica chegou ao clímax numa explosão de trabalho. Einstein finalmente conseguiu a concretizar suas ideias a respeito do universo. Ele analisou o fenômeno conhecido como movimento de rotina de gás, apresentou um brilhante argumento em apoio a teoria de que a matéria é formada por átomos e moléculas. Em outro trabalho, ele mostrou que o conhecimento de fisionomia dos cíntificos publicados no período *Annalen der Physik*. Num dos trabalhos, ele analisou o fenômeno conhecido como movimento rotativo, que é de admirar que esse trabalho tenha dado a Einstein uma premiação Nobel.

O terceiro trabalho, entretanto, era ainda mais brilhante. Ele resumia as ideias de Einstein da década anterior sobre a velocidade da luz e sua constância em relação ao observador. O trabalho estabelecia novos fundamentos para a física e finalmente assentaria as regras para o estudo do universo. Não era tanto o caráter constante da velocidade da luz que era importante, mas as consequências que Einstein previa. As repercussões eram atordoadas até mesmo para Einstein. Ele ainda era um homem jovem, acabara de completar 26 anos quando publicou sua pesquisa e expreu como sua teoria da relatividade especial. "Devo confessar que fiquei comigo a germinar em meu período de estudos de relatividade especial",

mas so viu aprender a ir muito depois. Ai está uma verdade profunda",

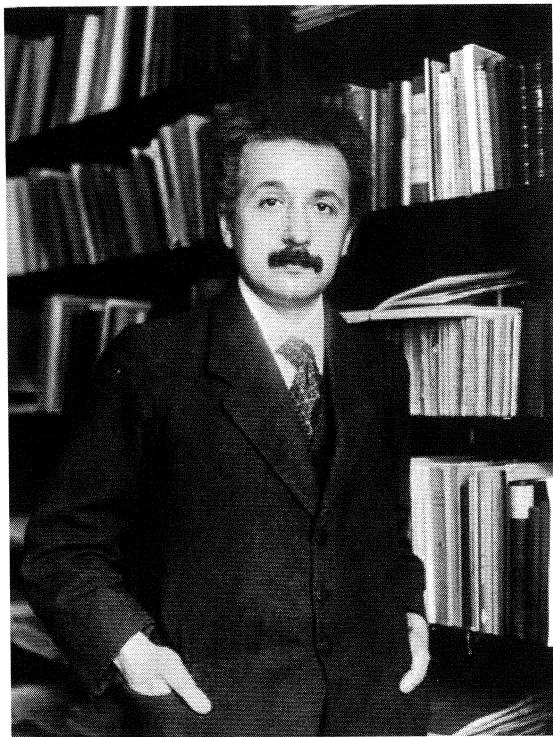


Figura 21 Albert Einstein fotografado em 1905, ano em que publicou a sua teoria da relatividade especial e firmou sua reputação.

Uma das consequências mais assombrosas da teoria da relatividade especial de Einstein é que nossa noção familiar de tempo é fundamentalmente errada. Os cientistas e os não-cientistas sempre conceberam o tempo como o avanço de algum tipo de relógio universal que tiquetaqueava sem parar, uma batida de coração cósmica, uma referência diante da qual todos os outros relógios poderiam ser acertados. O tempo seria o mesmo para todos, porque viveríamos no ritmo do mesmo relógio universal: o mesmo pêndulo oscilaria na mesma proporção hoje e amanhã, em Londres ou em Sydney, para você ou para mim. Presumia-se que o tempo era absoluto, regular e universal. Não, disse Einstein: o tempo é flexível, elástico e pessoal, assim o seu tempo pode ser diferente do meu tempo. Em particular, um relógio que se move em relação a você bate mais lentamente do que um relógio colocado

ao seu lado. Assim, se estive na plataforma da estação, o alta velocidade, eu percebe do que o meu.

Isso parece impossível, que se segue nos próximos tempo é pessoal para o ob desloca o relógio observado são bem simples, e, se você mente por que a relatividad mundo. Contudo, se pular preocupe, porque os aspect cálculo estiver completo.

Para entender o impacto ceito de tempo, vamos imag comum. Todos os relógios p gular que possa ser usado pa lante no relógio do vovô ou relógio de Alice, esse mecan dois espelhos paralelos, sep mostrado na figura 22(a). O a velocidade da luz é consta velocidade da luz é de 300.0 m/s), assim, se uma batida fe viajar de um espelho para o entre batidas é

$$\text{Tempo}_{\text{Alice}} = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade da luz}}$$

Alice leva seu relógio par uma velocidade constante ao de cada batida do relógio p

Allice levava seu relógio para dentro de um vagão de trem que se move com uma velocidade constante ao longo de um trilho reto. Ela vê que a duração de cada batida do relógio permanece a mesma — membre-se de que tido

$$\text{Tempo Alce} = \frac{\text{distancia}}{\text{velocidade}} = \frac{3,6\text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1,2 \times 10^{-8}$$

Para entender o impacto da teoria da relatividade especial sobre o conceito de tempo, vamos imaginar uma invenção, Alice, e seu relógio fora do comum. Todos os relógios precisam de um mecanismo com uma batida regular que possa servir para contar o tempo, assim como o pendulo oscilante no relógio do vovô ou o gotejar constante num relógio de aguia. No relógio de Alice, esse mecanismo é uma pulsação de luz que é refletida entre dois espelhos paralelos, separados por uma distância de 1,8 metro, como mostrado na figura 22(a). Os reflexos são ideais para medir o tempo perdido na velocidade da luz é constante, é assim o relógio será altamente preciso. A velocidade da luz é de  $300.000.000$  m/s (que pode ser escrito como  $3 \times 10^8$  m/s), assim, se uma batida for definida como o tempo para um pulso de luz viajar de um espelho para o outro e de volta, então Alice vive o tempo

Isso parece impossível, mas para Einstein era lógicamente inevitável. O que se segue nos próximos parágrafos é uma breve explicação de por que o tempo é pessosoal para o observador e depende da velocidade com que se desloca o relógio observado. Embora haja alguma matemática, as fórmulas são bem simples, e, se vocé puder seguir a lógica, entrado vai entender exatamente por que a relatividade especial nos forçou a mudar a nossa visão de mundo. Contudo, se pular a matemática ou ficar emperrado nela, não se preocupe, porque os aspectos mais importantes serão resumidos quando o calculo estiver completo.

na plataforma da estação, olhando para o seu relógio quando voce passa em alta velocidade, eu perceberia o seu relógio funcionando mais lentamente do que o meu.



deve permanecer igual porque o princípio da relatividade de Galileu diz que deveria ser impossível para ela dizer se está parada ou em movimento pela simples observação dos objetos que viajam com ela.

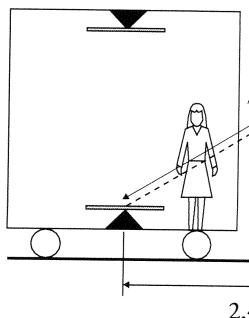
Enquanto isso, o amigo de Alice, Bob, está de pé na plataforma da estação enquanto o trem passa por ela a 80% da velocidade da luz, que é de  $2,4 \times 10^8$  m/s (esse é um trem expresso no sentido mais extremo da palavra). Bob pode ver Alice e seu relógio através de uma grande janela no vagão, e do seu ponto de vista o raio de luz descreve uma trajetória em ângulo, como mostrado na figura 22(b). Ele vê a luz fazendo seu movimento normal, para cima e para baixo, mas para ele a luz também se move lateralmente, junto com o trem.

Em outras palavras, enquanto deixava o espelho inferior e chegava ao espelho superior, o relógio moveu-se para diante, de modo que a luz teve que seguir uma trajetória diagonal. De fato, da perspectiva de Bob, o trem tinha se movido para a frente 2,4 metros na ocasião em que o raio chegou ao espelho superior, o que leva a um comprimento diagonal de três metros, assim o raio de luz teve que percorrer seis metros (para cima e para baixo) entre as batidas. E como, de acordo com Einstein, a velocidade da luz é constante para qualquer observador, para Bob, o tempo entre as batidas deve ser mais longo, porque o raio de luz viaja com a mesma velocidade mas tem que percorrer uma distância maior. A percepção do tempo de Bob entre os sinais do relógio é fácil de calcular:

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade}} = \frac{6,0 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ s}$$

É nesse ponto que a realidade do tempo começa a parecer estranhíssima e um tanto perturbadora. Alice e Bob se encontram para comparar suas anotações. Bob diz que viu o relógio-espelho de Alice pulsando uma vez a cada  $2 \times 10^{-8}$  s, enquanto Alice afirma que seu relógio estava pulsando uma vez a cada  $1,2 \times 10^{-8}$  s. Em relação a Alice, o seu relógio está funcionando perfeitamente. Alice e Bob podiam estar olhando para o mesmo relógio, mas eles percebiam a contagem do tempo acontecendo a taxas diferentes.

(a)



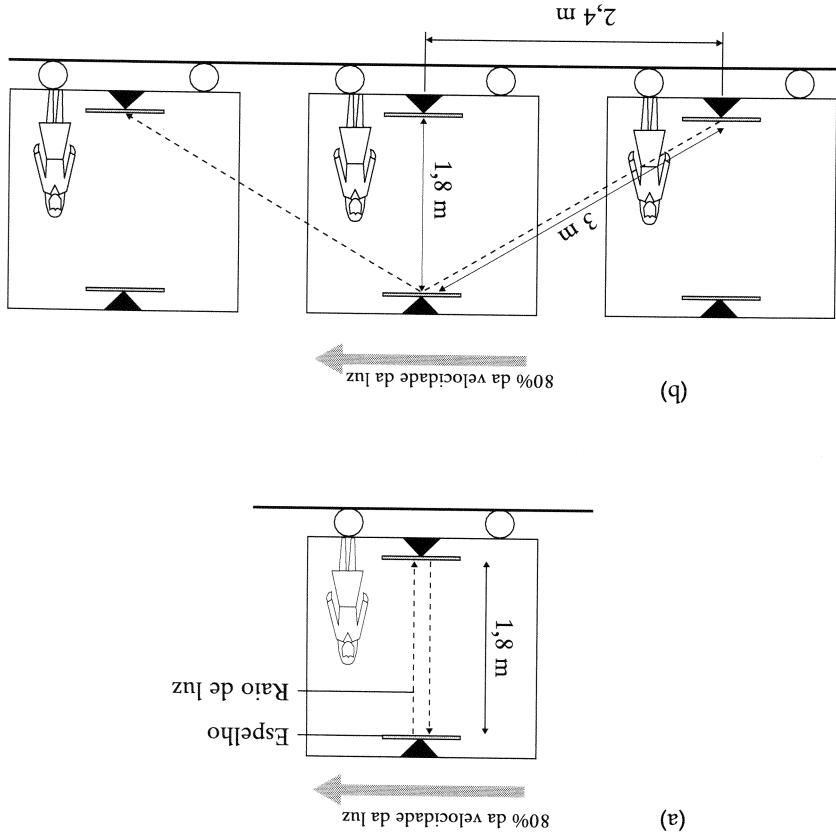
(b)

**Figura 22** O cenário seguinte ilustra o efeito de Lorentz-Fitzgerald, que é a contração de um relógio-espelho, que “bate” com a borda de um vagão que se move a 0,8c em relação a Alice, assim ela o vê se contraído.

O diagrama (b) mostra a perspectiva de Alice, assim ela vê o vagão se movendo a 8 m/s. Bob vê a Alice se movendo a 10 m/s, e, portanto, vê a sua trajetória diagonal. E, considerando que Alice é menor que Bob, Bob percebe que leva mais tempo para Alice passar por ele, ou seja, a sua percepção é mais longa. Assim, ele pensa que na percepção de Alice.

**Figura 22** O cenário seghinte demonstra uma das principais consequências da teoria da relatividade especial de Einstein. Alice encontra-se dentro de seu vagão de trem com seu relógio-especial, que “bate” com regularidade a medida que uma pulsação de luz é refletida entre dois espelhos. O diagrama (a) mostra a situação da perspectiva de Alice. O vagão é movendo a 80% da velocidade da luz, mas o relógio não se move em relação a Alice, assim ela o vêfuncionar de modo normal, à mesma taxa de sempre.

**Figura 22** O cenário segue a demonstração de que uma das principais consequências da reforma da



espeleho inferior e chegava ao  
lante, de modo que a luz treve  
da perspectiva de Bob, o trem  
casiao em que o raiio chegou ao  
entro diagonal de tres metros,  
entre os pilares (para cima e para baixo)  
Bob, o tempo entre as batidas  
a com a mesma velocidade mas  
cegao do tempo de Bob entre  
comega a parecer estranhissima  
ntram para comparar suas an-

utram para comparar suas an-

Allice pulando uma vez a cada  
delegio estava pulando uma vez a  
bar a o mesmo religio, mas elas

o a taxas diferentes.

se move lateralmente, juntando os movimentos normal, para trajeira em ângulo, como a grande Janeira no vagão, e do mais extremo da palavra. do Pê na plataforma da estação de Galileu diz que arada ou em movimento pela velocidade da luz, que é de 2,4 km ela.

Einstein criou uma fórmula que descreve como o tempo muda para Bob em relação a Alice sob cada circunstância:

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = \text{Tempo}_{\text{Alice}} \times \frac{1}{\sqrt{(1 - v_A^2/c^2)}}$$

Esta diz que os intervalos de tempo observados por Bob são diferentes dos observados por Alice, dependendo da velocidade de Alice ( $v_A$ ) relativa a Bob e a velocidade da luz ( $c$ ). Se inserirmos os números apropriados no caso descrito acima, então poderemos ver como a fórmula funciona.

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 1,2 \times 10^{-8} \text{ s} \times \frac{1}{\sqrt{(1 - (0,8c)^2/c^2)}}$$

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 1,2 \times 10^{-8} \text{ s} \times \frac{1}{\sqrt{(1 - 0,64)}}$$

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Einstein certa vez brincou dizendo: "Coloque sua mão em uma chapa quente durante um minuto e vai parecer uma hora. Sente ao lado de uma linda moça durante uma hora e vai parecer um minuto. Isso é relatividade". Mas a teoria da relatividade especial não era brincadeira. As fórmulas matemáticas de Einstein descreviam de modo preciso como qualquer observador perceberia genuinamente o atraso na passagem do tempo olhando para um relógio em movimento, um fenômeno conhecido como *dilatação do tempo*. Isso parece tão absurdo que levanta imediatamente quatro questões:

#### 1. Por que nunca notamos esse efeito?

A magnitude da dilatação do tempo depende da velocidade do relógio ou objeto em questão comparada com a velocidade da luz. No exemplo, a dilatação do tempo é significativa porque o vagão de Alice se desloca a 80% da velocidade da luz, ou seja, 240.000.000 m/s. Contudo, se o vagão estivesse viajando a uma velocidade mais razoável de 100 m/s (360 km/h), então a

percepção de Bob do . Colocando os números que a diferença na perç trilhão. Em outras palavras os efeitos da dilatação c

#### 2. Essa diferença é real?

Sim, é bem real. Existem tecnologia, que precisam funcionarem adequadamente que depende de satélites como os sistemas de navegação levam em consideração os efeitos da dilatação porque os satélites cronômetros de alta prec

#### 3. A teoria da relatividade que dependem de raios de

A teoria se aplica a todos os que acontece porque a luz é emitida em nível atômico. Portanto, os raios de um vagão se retardam do ponto de vista de Alice. As interações atômicas indiretas retardamento atômico. A Alice viajando mais lentamente, Bob a vê piscando mais lentamente e pensaria mais lento. Alice viajaria mais lentamente. Tudo seria afetado por essa dilatação temporal.

#### 4. Por que Alice não pode provar que o vagão está em movimento?

Todos os efeitos peculiares da teoria da relatividade especial são perfeitamente normal, porque Alice e Bob estão se movendo em velocidades diferentes.

4. Por que Alice não pode usar o artilhão de seu relógio e a lenitidão de seus movimentos para provar que esta se moveuendo?

Todos os efeitos peculiares descritos acima são observados por Bob de fora do trem em movimento. No que concerne a Alice, tudo dentro do trem é extra preferitamente normal, porque nem o seu relógio nem os outros objetos no vagão estão se movendo a ela. Movimento relativo zero significa que Alice está se movendo em relação a ela.

2. Essa diferença é real?

Sim, é bem real. Existem muitas peças de equipamentos sofisticados, de alta tecnologia, que precisam levar em conta o efeito da dilatação do tempo para funcionarem adequadamente. O Sistema de Posicionamento Global (GPS), que depende de satélites para determinar localizações por meio de aparelhos como os sistemas de navegação dos carros, se funciona com precisão por que levanta em consideração os efeitos da relatividade especial. Tais efeitos são significativos porque os satélites GPS viajam a velocidades muito altas e usam cronômetros de alta precisão.

3. A teoria da relatividade especial de Einstein se aplica apenas a relações que dependem de raios de luz?

A teoria se aplica a todos os relógios e, de fato, a todos os fenômenos. Isto acarreta por que a luz realmente determina as interações atômicas que acontecem no nível atômico. Portanto, todas as interações atômicas que acontecem no espaço por que a luz realmente determina as interações atômicas que acontecem no nível atômico. Ele não pode perceber essas interações atômicas individuais, mas pode ver o efeito combinado dessas interações atômicas individuais. Além de ver o efeito combinado dessas interações atômicas individuais, pode ver o efeito de Alice pisando mais lentamente, Bob a veria acenar mais lentamente quanto passava, ela pisaria mais lentamente, e Peteria acenaria mais lentamente quanto passava, ela pisaria mais lentamente. Tudo seria afetado de modo semelhante pelo mesmo grau de dilatação. Essa é a conclusão de Einstein.

percépção de bob do relógio de Alice seria quase igual a percépção de Alice seria quase igual a percépção de bob do relógio de Alice. Colocando os números correspondentes na equação de Einstein mostraria que a diferença na percepção do tempo pelo casal seria de uma parte em 1 trilhão. Em outras palavras, é impossível para os seres humanos detectarem os efeitos da dilatação do tempo no dia-a-dia.

dilatação temporal zero. Não devemos nos surpreender que não haja dilatação de tempo, porque, se Alice notasse qualquer mudança ao seu redor, como resultado do movimento do vagão, isso contrariaria o princípio da relatividade de Galileu. Entretanto, se Alice olhasse para Bob enquanto passava zunindo por ele, a ela pareceria que Bob e seu ambiente estão sofrendo uma dilatação temporal, porque ele estaria se movendo em relação a ela.

A teoria da relatividade especial atinge outros aspectos da física de modo igualmente atordoante. Einstein mostrou que, à medida que Alice se aproxima, Bob percebe que ela se contrai na direção de seus movimentos. Em outras palavras, se Alice tem dois metros de altura e 25 centímetros da frente para trás, e está olhando para a parte dianteira do trem enquanto este se aproxima de Bob, então ele a veria com dois metros de altura mas com apenas 15 centímetros de espessura. Ela pareceria mais magra. Isso não é nada tão trivial quanto uma ilusão baseada na perspectiva, mas é de fato uma realidade na visão de Bob da distância e do espaço. É uma consequência do mesmo tipo de raciocínio que faz Bob observar o relógio de Alice funcionando mais lentamente.

Assim, além de investir contra as noções tradicionais de tempo, a relatividade especial forçava os físicos a reconsiderarem suas noções arraigadas de espaço. Em lugar de tempo e espaço serem constantes e universais, eram flexíveis e pessoais. Não surpreende que o próprio Einstein, à medida que desenvolvia sua teoria, às vezes achasse difícil confiar em sua própria lógica e conclusões. “Esse argumento é sedutor e divertido”, disse ele, “mas, pelo que sei, o Senhor pode estar rindo de mim e me fazendo andar em círculos”.

Apesar disso, Einstein superou suas dúvidas e continuou a seguir a lógica de suas equações. Depois que sua pesquisa foi publicada, os estudiosos viram-se forçados a reconhecer que um solitário funcionário de patentes tinha feito uma das descobertas mais importantes da história da física. Max Planck, o pai da teoria quântica, disse a respeito de Einstein que “se [a relatividade] se mostrar correta, e eu espero que seja, ele será considerado o Copérnico do século XX”.

As previsões de Einstein da dilatação do tempo e da contração do comprimento foram todas confirmadas por experiências no devido tempo. Só a

sua teoria da relatividade dos físicos mais brilhantes da física vitoriana. Mas a

Logo depois de publicar num programa de rádio no devido contexto, Einstein criou uma “brincadeira de recompensas, contudo, revelaria como o unicórnio cosmólogo as ferramentas fundamentais imagináv

## A batalha da

As idéias de Einstein e a comunidade científica a bordo ele tivesse publicado em 1908 que recebeu em Berna. Entre 1905 e 1915, patentes em Berna, onde “classe” e ganhou tempo de sua teoria da rela

A teoria da relatividade não era apenas a situações especiais de velocidade constante. Era quando o trem de Alice era reto, mas não com um trânsito. Conseqüentemente, Einstein não pudesse lidar com situações de extensão da relatividade geral, porque se a

Quando Einstein fez a teoria da relatividade geral em 1905, a

Quando Einstein fez o seu primeiro grande avanço para a criação da relatividade geral em 1907, ele o classificou como "o dia mais feliz da minha vida". Porque se aplicaria a situações mais generalizadas.

A teoria da relatividade especial e rotulada de *especial* porque se aplica apenas a situações especiais, aquelas nas quais os objetos se movem a uma velocidade constante. Em outras palavras, ela poderia lidar com Bob observando o trem de Alice em deslocamento a uma velocidade fixa em um trilho reto, mas não com um trem que estivesse acelerado ou perdeendo velocidade. Conseqüentemente, Einstein tentou reformular sua teoria de modo que ela pudesse lidar com situações envolvendo aceleração e deceleração. Essa grande extensão da relatividade especial logo se tornaria conhecida como *relatividade geral*.

As ideias de Einstein eram tão iconoclasticas que levou tempo para que comunidade científica acolhesse esse funcinário público em seu meio. Em 1908 que recebeu seu primeiro doutorado acadêmico na Universidade de Berma. Entre 1905 e 1908, Einstein continuou a trabalhar no escritório de patentes em Berma, onde foi promovido a "especialista técnico de segunda classe" e ganhou tempo para prosseguir com seu esforço de estender o poder da teoria da relatividade.

## A batálha da gravideade: Newton versus Einstein

uma teoria da relatividade especial teria sido suficiente para fazer dele um dos físicos mais brilhantes do século XX, provocando uma revisão radical da física vitoriana. Mas a estatura de Einstein o levaria a alturas ainda maiores. Logo depois de publicar seus trabalhos, em 1905, ele conseguiu a traba- lhar num programa de pesquisas ainda mais ambicioso. Para coloca-lo no devído contexto, Einstein certa vez chamou sua teoria da relatividade espec- cial uma "brincadeira de criança" comparada com o que viria depois. As recompenças, contudo, valeriam o esforço. Sua proxima grande descoberta revelaria como o universo se comporia em grande escala e daria aos cosmólogos as ferramentas de que precisavam para abordar as questões mais fundamentais imagináveis.

vida". O que se seguiu, contudo, foram oito anos de tormento. Ele contou a um amigo como a sua obsessão com a relatividade geral o estava forçando a negligenciar todos os outros aspectos de sua vida: "Eu não tenho tempo para escrever porque estou ocupado com coisas verdadeiramente grandes. Dia e noite eu torturo meu cérebro num esforço para penetrar mais profundamente nas coisas que descobri nos dois últimos anos e que representam um avanço sem precedentes nos problemas fundamentais da física".

Ao falar em "coisas verdadeiramente grandes" e "problemas fundamentais", Einstein se referia ao fato de que a teoria da relatividade geral parecia estar conduzindo-o a uma teoria inteiramente nova da gravidade. Se Einstein estava certo, então os físicos seriam forçados a questionar o trabalho de Isaac Newton, um dos ícones da física.

Newton nasceu em circunstâncias trágicas no dia de Natal de 1642, seu pai tendo morrido três meses antes. Enquanto Isaac ainda era criança, sua mãe casou de novo com um reitor de 63 anos de idade, Barnabas Smith, que se recusou a aceitar Isaac em sua casa. Coube aos avós de Isaac a tarefa de criá-lo, e a cada ano que passava ele desenvolvia um ódio crescente em relação à mãe e ao padrasto, que o tinham abandonado. De fato, quando estudante universitário, ele fez uma lista dos pecados da sua infância, que incluía a admissão de "ameaçar meu pai e minha mãe Smith de queimá-los com sua casa".

Não surpreende que Newton se tornasse um homem amargurado, isolado e às vezes cruel. Quando foi nomeado diretor da Casa da Moeda, em 1696, ele implementou um duro regime de caça aos falsificadores, cuidando para que os condenados fossem enforcados, arrastados e esquartejados. A falsificação da moeda levara a Grã-Bretanha à beira do colapso econômico, e Newton achava que suas punições eram necessárias. Além de empregar a brutalidade, Newton usou seu cérebro para salvar a economia nacional. Uma de suas inovações mais importantes na Casa da Moeda foi a introdução de bordas serrilhadas nas moedas para combater a prática do desbaste, pela qual os falsificadores cortavam as beiradas das moedas e usavam as lascas para fazer novas moedas.

Em reconhecimento pela contribuição de Newton, a moeda britânica de duas libras, emitida em 1997, tinha a frase DE PÉ NOS OMBROS DE GIGANTES em torno de sua borda serrilhada. Essas palavras foram extraídas de uma

carta que Newton enviou escrevendo: "Se pude enxergar ombros de gigantes". Isso não é de que as próprias idéias ilustres predecessores era uma referência velada. Em outras palavras, um gigante fisicamente, n

Contudo, apesar de se buição sem paralelo para mentos para uma nova e durou pouco mais de 18 meses como o *annus mirabilis* (mente o título de um período mais sensacionais que ocorreu depois do Grande Inquérito. Os cientistas, todos os verdadeiros milagres de cálculo, óptica e,

Em essência, a lei da universo atrai outro objeto atração entre dois objetos

A força ( $F$ ) entre dois objetos quanto maior a massa, maior a porcional ao quadrado da massa a força fica menor à força gravitacional ( $G$ ) é sempre menor que a gravidade comparada com a massa.

O poder dessa fórmula Galileu tentado e

Galileu tinha tentado explicar sobre o Sistema Solar. Por exemplo, o fato de poder dessa formula é que ela abrange tudo que Copérnico, Kepler e gravidade comparada com outras forças, como o magnetismo.

gravitacional (G) é sempre igual a  $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ , e reflete a força da porcional ao quadrado da distância entre os objetos ( $r^2$ ), o que significa que a força é menor à medida que os objetos se afastam. A constante de gravidade é de  $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

A força ( $F$ ) entre dois objetos depende das massas dos objetos ( $m_1$  e  $m_2$ ) —

$$F = \frac{G \times m_1 \times m_2}{r^2}$$

entre dois objetos quaisquer como atração entre dois outros objetos quaisquer como universo atrai outro objeto. Mais exatamente Newton definiu a força de atração gravitacional, a lei da gravidade de Newton afirma que cada objeto no universo atrai outro objeto.

Em essência, a lei da gravidade de Newton define a força de gravidade que atua entre dois objetos quaisquer, de forma que a força é direta proporcional ao quadrado da distância entre os objetos ( $r^2$ ), o que significa que a força é menor à medida que os objetos se afastam. A constante de gravidade é de  $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

Newton apesar de seus defeitos como pessoso, Newton fez uma contribuição sem paralelo para a ciência do século XVII. Ele estabeleceu os fundamentos para uma nova era científica com uma ofensiva de pesquisas que durou pouco mais de 18 meses, culminando em 1666, que hoje é conhecido como o *annus mirabilis* (ano milagroso) de Newton. O termo era originalmente o título de um poema de John Dryden sobre outros acontecimentos sensacionais que ocorreram em 1666, ou seja, a sobrevivência de Londres depois do Grande Incêndio e a vitória da Flota Inglesa sobre a dinamarquesa. Os cientistas, todavia, consideram que as descobertas de Newton foram mais sensacionais que o ocorrido em 1666, ou seja, a sobrevivência de Londres depois do Grande Incêndio e a vitória da Flota Inglesa sobre a dinamarquesa. Os cientistas, todavia, consideram que as descobertas de Newton foram mais sensacionais que o ocorrido em 1666, ou seja, a sobrevivência de Londres depois do Grande Incêndio e a vitória da Flota Inglesa sobre a dinamarquesa. Os cientistas, todavia, consideram que as descobertas de Newton foram mais sensacionais que o ocorrido em 1666, ou seja, a sobrevivência de Londres depois do Grande Incêndio e a vitória da Flota Inglesa sobre a dinamarquesa.

Newton enviou para seu colega cientista Robert Hooke, na qual

de uma maçã cair em direção ao solo não significa que esta queira chegar ao centro do universo, mas simplesmente que ambas, a Terra e a maçã, têm massa, e assim são atraídas naturalmente uma para a outra pela força da gravidade. A maçã acelera em direção à Terra, e ao mesmo tempo até mesmo a Terra acelera em direção à maçã, embora o efeito sobre a Terra seja imperceptível, porque esta é muito mais maciça do que a maçã. De modo semelhante, a equação da gravidade de Newton pode ser usada para explicar como a Terra orbita o Sol, porque ambos os corpos têm massa e portanto existe uma atração mútua entre eles. Novamente, a Terra orbita o Sol e não vice-versa, porque a Terra é muito menos maciça do que o Sol. De fato, a fórmula da gravidade de Newton pode até mesmo ser usada para prever que luas e planetas vão percorrer trajetórias elípticas, o que é exatamente o que Kepler demonstrou depois de analisar as observações de Tycho Brahe.

Durante séculos depois de sua morte, a lei da gravitação de Newton reinou sobre o cosmos. Os cientistas presumiam que o problema da gravidade tinha sido resolvido e usavam a fórmula de Newton para explicar tudo, do vôo de uma flecha à trajetória de um cometa. O próprio Newton, entretanto, suspeitava de que seu entendimento do universo estava incompleto: “Eu não sei como o mundo me vê, mas para mim eu tenho sido apenas um menino brincando na praia, e me divertindo aqui e ali ao encontrar uma pedra mais polida ou uma concha mais bonita do que as outras, enquanto o grande oceano da verdade permanece desconhecido diante de mim”.

E foi Albert Einstein quem primeiro percebeu que poderia existir mais coisas na gravidade do que Newton imaginara. Depois do seu próprio *annus mirabilis* em 1905, quando Einstein publicou vários trabalhos históricos, Einstein concentrou-se em ampliar sua teoria da relatividade especial para uma teoria geral. Isso envolvia uma interpretação radicalmente diferente da gravidade baseada em uma visão diferente de como os planetas, as luas e as macas se atraem uns aos outros.

No cerne da nova abordagem de Einstein estava a descoberta de que a distância e o tempo são flexíveis, o que era uma consequência da sua teoria da relatividade especial. Lembrem-se de que Bob vê um relógio andando mais devagar e Alice ficando mais magra à medida que se movem em sua direção. Assim, o tempo é flexível, assim como as três dimensões do espaço

(largura, altura e profundidade como do tempo são indúntica entidade flexível coiflexível se revelou a causinha flexibilidade é sem dúvida maneira razoavelmente gravidade.

O espaço-tempo é forte de tempo, o que é inimaginável é mais fácil considerar a na figura 23. Felizmente as características-chave do ataplificação conveniente. A figura-tempo) é como um pedaço de madeira que se pode mostrar que, se nada estiver a impedir, é imperturbável. A figura 23 é bastante se um objeto for capaz de representar o espaço se a elástica curvando-se sob o

De fato, a analogia da bolha representa o Sol, pode ser lançada em órbita bola de tênis na verdade carrega enquanto circula. Síriamos tentar rolar uma bolha de tênis fazendo-a girar ao seu redor, os correriam em torno do fuso.

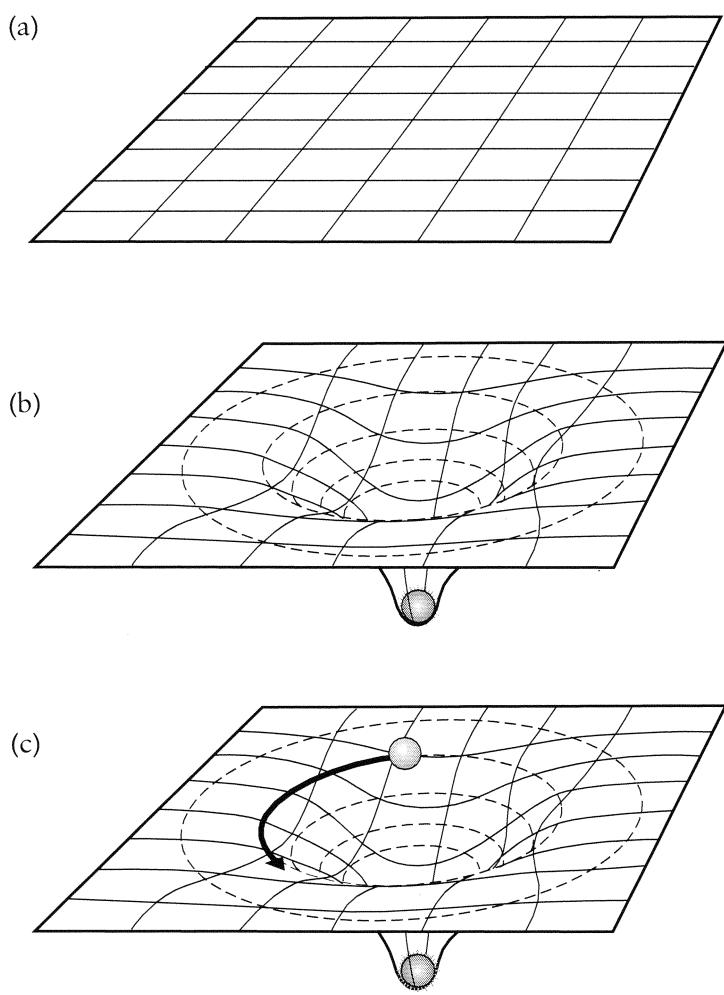
Na prática, qualquer tecido colocado sobre uma cama elástica logo desaparece. Isso é devido ao movimento natural dos objetos que estão sobre a cama. Assim, é naturalmente esse tipo de efeito de desaparecimento de objetos no espaço-tempo. De acordo com a teoria da relatividade, os testemunhavam fenômenos que pareciam desaparecer de眼前 (em frente a olhos) e que estavam realmente vendo o que desaparecia.

Na prática, qualquer tentativa de modelar um sistema complicado em mola elástica logo desmorona devido a fricção do tecido que agita o movimento natural dos objetos. Não obstante, Einstein afirmava que extra- mente esse tipo de efeito de cama elástica estava acontecendo no tecido do espaço-tempo. De acordo com Einstein, sempre que os fioscos de astrolabios estavam realmente vendendo objetos reagindo à curvatura do espaço-tempo.

De fato, a analogia da cama elástica pode ser estendida. Se uma bola de boleia representa o Solo, então uma bola de ténis representa a Terra. Boleia concava representa a órbita ao redor deles, como mostrado na figura 23(c). A bola de ténis na verdade cria sua própria depressão na cama elástica e carrega enduamento circular. Se quiséssemos um modelo da Lua, então pode-íamos tentar rolar uma bolinha de gude na depressão causada pela bola de ténis fazendo-a girar ao seu redor enduanto a bola de ténis e sua concavidade correia em torno do fôsso causado pela bola de boleia.

O espaço-tempo é formado por quatro dimensões, três de espaço e uma de tempo, o que é inimaginável para a maioria dos mortais, assim, geralmente é mais fácil considerar apenas duas dimensões de espaço, como mostrado na figura 23. Felizmente esse espaço-tempo rudimentar ilustra muitas das características-chave do autêntico espaço-tempo, de modo que é uma simulação conveniente. A figura 23(a) mostra que o espaço (de fato, o espaço-tempo) é como um pedaço de tecido esticado, e a grade de linhas ajuda a visualizar que, se nada estiver ocupando o espaço, então seu "tecido" é plano e impermeável. A figura 23(b) mostra como o espaço bidimensional muda bastante se um objeto for colocado sobre ele. Este segundo diagrama pode-  
ria representar o espaço senado torcido por um Sol maciço, como uma cama elástica curvando-se sob o peso de uma bola de boliche.

(lаргюра, альтра e профункциада). Além disso, as flexibilidades tanto do espaço quanto do tempo são indissociáveis, o que leva o Einstein a considerar uma unicidade entre a flexibilidade concebida como espaço-tempo. Ele espalha o tempo e revelou a causa subjacente à gravidade. Essa progressão de extra-dimensões é sem dúvida atorodante, mas o paragrapfo segue unicamente para a maneira razoavelmente fácil de visualizar a filosofia de Einstein para a gravidade.



**Figura 23** Estes diagramas são representações bidimensionais do espaço-tempo quadridimensional, ignorando uma dimensão de tempo e uma de espaço. O diagrama (a) mostra uma tela chata, lisa, não perturbada, representando o espaço vazio. Se um planeta passasse por este espaço, ele seguiria em uma linha reta.

O diagrama (b) mostra o espaço torcido por um objeto como o Sol. A profundidade da depressão depende da massa do Sol.

O diagrama (c) mostra um planeta orbitando a depressão causada pelo Sol. O planeta provoca sua própria pequena depressão no espaço, que é demasiado pequena para ser representada neste diagrama porque o planeta é relativamente leve.

Por exemplo, Newton diria que a força de atração gravitacional é proporcional ao quadrado do distanciamento profundo do que o planeta caía no solo porque estava vinculado pela massa da Terra.

A presença de objetos relativamente massivos é de mão dupla. A forma do espaço-tempo é alterada, e, ao mesmo tempo, esse espaço-tempo é alterado. Em outras palavras, o Sol e os planetas são causas de curvatura. Wheeler, um dos principais apoiadores da teoria de Einstein, disse: “A matéria diz ao espaço-tempo como se mover”. Embora a teoria de Einstein seja concisa (“espaço” deveria ser “espacotempo”), a teoria de Einstein é a teoria de Einstein.

Essa noção de espaço-tempo curvado fez Einstein se convencer de que era necessário um novo critério estético, o elo entre a teoria e a experiência. “Se a teoria é verdadeira, ou, como eu diria, se a teoria é verdadeira, eu pergunto a mim mesmo se a teoria é verdadeira desse modo”. Entretanto, Einstein sabia que estava certo, tinha que ser verdadeira. Seu maior desafio era combinar espaço-tempo e gravidade descritas por ele em uma teoria geral, colocada em uma rigidez matemática.

Einstein levaria oito anos para fundamentar sua intuição com cálculos matemáticos. Durante esse período, ele se sentiu frustrado por períodos em que seus cálculos eram errados. Einstein levaria Einstein à beira de um ataque de depressão. As crises de sua frustração são reveladas em cartas que ele escreveu para os amigos durante esse período. “Preciso me ajudar ou eu vou me matar”, disse Einstein. “Preciso me ajudar ou eu vou trabalhar na relatividade era de Einstein”.

trabalhar na relatividade era como suportar "uma chuva de logo e enxofre". Precisa me ajudar ou eu vou ficar maluco!". A Paul Ehrenfest ele disse que para os amigos durante esses anos. Ele impôs a Marcel Grossmann: "Você de sua frustação só revelados nos breves comentários que ele fez em cartas levaria. Einstein é beira de um colapso nervoso. Seu estado mental é o nível períodos em que seus cálculos pareciam se desfazer. O esforço intelectual co. Durante esse período, enfrentou grandes obstáculos e teve que suportar fundamental sua intuição com um argumento matemático de lógica. Einstein levava aí oito anos de árdua pesquisa teórica antes que pudesse

geral, colocada em uma rigorosa estrutura matemática. go-tempo e gravidade descrita acima em uma teoria formal da relatividade teoria. Seu maior desafio era transformar uma noção um tanto vaga de espaço que estava certo, tinha que desenvolver uma fórmula que englobasse sua desse modo". Entretanto, Einstein precisava convencer o resto do mundo de teoria, eu perguntei a mim mesmo se, caso eu fosse Deus, teria feito o mundo ser verdadeiro, ou, como Einstein resumiu: "Quando estou julgando uma certeza estética, o elo entre o espaço-tempo flexível e a gravidade tinha de estar a convenção de que era certa. De acordo com seu princípio conjunto de

essa noção de espaço-tempo flexível pode parecer maluca, mas Einstein teoria de Einstein.

Essa noção de espaço-tempo flexível deve ser "espaço-tempo", ainda é um bom resumo da conceção ("espaço" deveria ser "espaço-tempo"), embora Wheeler tivesse sacrificado a precisão de como se mover". Embora Wheeler tivesse sacrificado a teoria com o dito: "A matéria diz ao espaço como se curvar; e o espaço diz à matéria, um dos principais relativistas gerais do século XX, resumiria a teoria Wheeler, um dos planetas causadas pelo mesmo Sol e pelos planetas. John o Sol e os planetas são causadas pelo mesmo Sol e espaço-tempo que guiam go-tempo. Em outras palavras, as concavidades no espaço-tempo da espaço, e, ao mesmo tempo esses mesmos objetos influenciam a forma do espaço-tempo. A forma do espaço-tempo influencia o movimento dos objetos, e mão dupla. A forma do espaço-tempo de objetos no espaço-tempo pro-

A presença de objetos no espaço-tempo dá origem a um relacionamento

caia no solo porque estava caido no fosso profundo no espaço-tempo pro-

fundimento profundo do que provocava esta atração: a magia simplesmente forga de atração gravitacional mutua, mas Einstein agorá sentia ter um en-

Por exemplo, Newton diria que uma magia caiu no solo porque existia uma

relativamente leve. logo, que é demaisado pede que a para-  
depresso causada pelo Sol. O pla-

objetivo como o Sol. A profundidade  
la linha reta.

representando o espaço vazia. Se um tipo e uma de espaço. O diagrama

dimensionais do espaço-tempo

la linha reta.

Em outra carta, ele se afligia por “novamente ter perpetrado alguma coisa na teoria da gravitação que me arrisca a ser confinado num hospício”.

A coragem necessária para essa aventura em território intelectual não mapeado não deve ser subestimada. Em 1913, Max Planck aconselhou Einstein a não trabalhar na relatividade geral. “Como um velho amigo eu devo aconselhá-lo contra isso, primeiro porque não terá sucesso e, se tiver, ninguém acreditará em você.”

Einstein perseverou, suportou a provação e finalmente completou sua teoria da relatividade geral em 1915. Como Newton, Einstein por fim desenvolvera uma fórmula matemática para explicar e calcular a força da gravidade em todas as situações concebíveis, mas a fórmula de Einstein era bem diferente e montada sobre uma premissa completamente independente — a existência do espaço-tempo flexível.

A teoria da gravidade de Newton fora suficiente para a física dos dois séculos anteriores, assim, por que os físicos deveriam abandoná-la subitamente em troca da nova teoria de Einstein? A teoria de Newton podia prever com sucesso o comportamento de tudo, de maçãs a planetas, de balas de canhão a gotas de chuva, assim, para que servia a teoria de Einstein?

A resposta se encontra na natureza do avanço científico. Os cientistas tentam criar teorias para explicar e prever os fenômenos naturais de modo tão preciso quanto possível. Uma teoria pode funcionar satisfatoriamente durante alguns anos, décadas ou séculos, mas os cientistas acabam desenvolvendo e adotando uma teoria melhor, uma que seja mais precisa, que funcione em uma variedade maior de situações, ou que explique fenômenos antes inexplicados. Foi o que aconteceu com os antigos astrônomos e seu entendimento da posição da Terra no cosmos. Inicialmente os astrônomos acreditavam que o Sol orbitava uma Terra estacionária, e graças aos epiciclos e deferentes de Ptolomeu, esta era uma teoria razoavelmente bem-sucedida. De fato, os astrônomos a utilizavam para prever os movimentos dos planetas com uma precisão razoável. Contudo, a teoria centrada na Terra acabou sendo substituída por uma teoria do universo centrado no Sol, porque esta nova teoria, baseada nas órbitas elípticas de Kepler, era mais precisa e podia explicar as novas observações telescópicas, como as fases de Vênus. Foi uma transição longa e difícil de uma teoria para a outra.

tra, mas, uma vez que havia caminho de volta

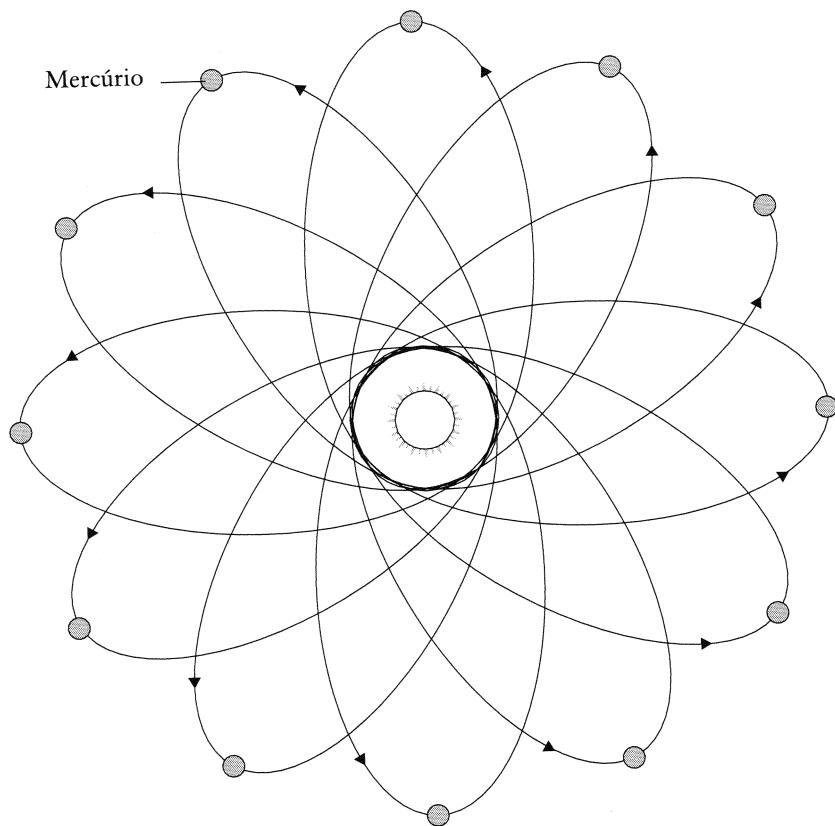
Do mesmo modo, iria melhor da gravidade. Einstein suspeitava que falhar em determinadas sucedida em todas as situações daria resultados incorretos. A teoria da gravidade seria e estava certo, Einstein tentou e testar ambas, acreditasse a realidade da verdadeira teoria da gravidade.

O problema para Einstein era que, mesmo nível de gravidade eram igualmente bem-sucedidas. Ele percebeu que, de modo a encontrar expor as falhas na teoria, um tremendo campo gravitacional de Mercúrio, sentiria os efeitos da atração do Sol de um modo que funcionava com a sua. Em 18 de fevereiro de 1919, precisava — um caso raro — que os astrônomos havia décadas.

Em 1859, o astrônomo Urbain Le Verrier notou uma anomalia na órbita de Mercúrio, que era de vez de ser fixa, a elíptica. A órbita elíptica é mais curva que a órbita elíptica de um espirográfico. O movimento de Mercúrio é mais curvo que o de um arco por século, e levou mais tempo para percorrer uma órbita.

Os astrônomos tinham

O problema para Einstein é que todos os cenários terrestres envolviam o mesmo nível de gravidade medíocre e, nessas condições, ambas as teorias eram igualmente bem-sucedidas e davam resultados iguais. Conseqüente mente, ele percebeu que teria que se voltar para além da Terra, para o espaço, de modo a encontrar um ambiente de gravidade extremamente forte, que expor as falhas na teoria de Newton. Em especial, ele sabia que o Sol tinha um tremendo campo gravitacional e que o planeta mais próximo do Sol, Mercúrio, sentiria os efeitos gravitacionais de que o planeta mais distante se atraía ao Sol era forte o bastante para fazer Mercúrio se compar tar de um modo que fosse incomparável com a teoria de Newton e de acordo com a sua. Em 18 de novembro de 1915, Einstein encontrou o teste de que precisava — um caso de comporatamento planeteário que intrigava os astrô-



**Figura 24** Os astrônomos do século XIX ficaram intrigados com um desvio da órbita de Mercúrio. Este é um diagrama exagerado, já que a órbita de Mercúrio é menos elíptica (ou seja, mais circular) e o Sol está mais perto do centro da órbita. E, o que é mais importante, a torção da órbita foi exagerada. Na realidade, cada órbita avança apenas  $0,00038^\circ$  em relação à anterior. Quando lidam com ângulos muito pequenos, os cientistas usam minutos e segundos em lugar de graus:

$$1 \text{ minuto} = 1/60^\circ$$

$$1 \text{ segundo} = 1/60 \text{ minuto} = 1/3.600^\circ$$

Assim, cada órbita de Mercúrio avança aproximadamente  $0,00038^\circ$  ou 0,023 minutos, ou 1.383 segundos com relação à órbita anterior. Mercúrio leva 88 dias para orbitar o Sol, assim, depois de um século na Terra, Mercúrio completa 415 órbitas e sua órbita avançou de  $415 \times 1.383 = 574$  segundos.

Mercúrio era causado pela temática Solar dando puxões e gravidade de Newton, Le Verrier explicava apenas 5 planetas e tecia a cada século. Isso inexplicados. De acordo com o extra, invisível na órbita de Júpiter de asteróides ou uma liga que sugeriram a existência de um planeta que ficaria entre Mercúrio e Júpiter. Eles miraram que a fórmula da gravidade devia estar na incapacidade de envolvidos. Assim que tiveram a resposta certa de 574 seguiu

Einstein, por sua vez, tinha a fórmula da gravidade de Newtonmente em termos de descrição da Terra, mas Einstein estava confrontado com situações extremas encontradas nas previsões da teoria da gravidade de Newton. Estas duas teorias rivais e Einstein precisaram mudar na órbita da Terra.

Fez os cálculos necessários foram 574 segundos de ar. “Por alguns dias eu fiquei creveu.

Por azar, a comunidade conservadoras, como já vim razões emocionais. Se uma tem que ser abandonada, conciliar com a nova teori

conciliar com a nova teoria. Tal como gão só se justifica se a comunidade tem que ser abandonada, e o que resta da estrutura científica tem que se razões emocionais. Se uma nova teoria derribar uma antigá, a velha teoria conservadouras, como já vimos, em parte por motivos práticos e em parte por com os cálculos de Einstein. As instituições científicas são imponentemente

Por aí, a comunidade científica não estava interamente convencida

creveu.

“Por alguns dias eu fiquei fora de mim com a alegria e a exaltação”, esforçam 574 segundos de arco, o que estava de acordo com as observações.

Fez os cálculos necessários usando sua própria fórmula e o resultado

precisão a mudanças na órbita de Mercúrio.

duas teorias rivais e Einstein esperava que sua própria teoria explicasse com precisão as encontadas nas proximidades do Sol estavam fora da área de segurança de Newton. Esta era a arena perfeita para a competição entre as teorias, mas Einstein estava convencido de que as condições gravitacionais Terra, mas Einstein estava convencida na gravidade mais fraca da mente em termos de descrever o que acontecia na gravidade mais fraca da fórmula da gravidade de Newton. A teoria de Newton funcionava perfeitamente ao contrário de asteroides desconhecido, e que o problema estava na

Einstein, por sua vez, tinha certeza de que não existia nenhum planeta,

resposta certa de 574 segundos de arco.

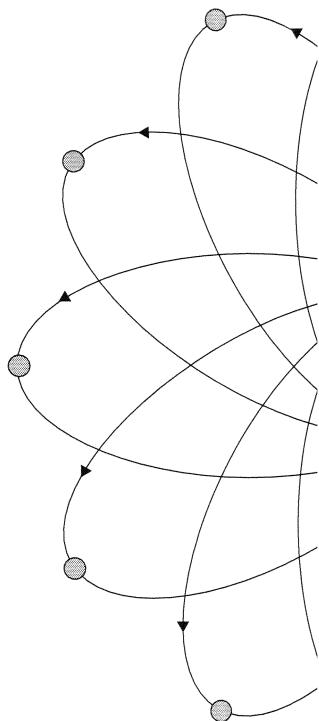
havia, a lua ou o planeta, elas estavam refazendo os cálculos e obter a mesma. Assim que tivessem encerrado o cinturão de asteroides desco- envolvidos. Assim que tivessem encerrado o cinturão de asteroides desco- ma devia estar na incapacidade deles de considerar todos os fatores miram que a fórmula da gravidade de Newton estava correta e que o problema ficaria entre Mercúrio e o Sol. Em outras palavras, os astromônimos presu- supostamente existência de um planeta ainda não descoverta, chamado Vulcano, prior de asteroides ou uma lua desconhecida de Mercúrio. Alguns até mesmo extra, invisível na órbita de Mercúrio, como por exemplo um influenciador de asteroides. De acordo com alguns estudos, devia haver uma influência extra, explicados. De acordo com a explicava que 43 segundos de arco ficavam tecia a cada segundo. Isto significava que 574 segundos de arco da teoria a planetas explicava apenas 531 dos outros combinado dos outros gravidade de Newton. Le Verrier descovertiu que o efeito combinado das

Mercúrio era causado pela atração gravitacional dos outros planetas do Sis-

templeta 415 órbitas e sua órbita completa leva 88 dias para orbitar o centro 0,00038° ou 0,023 minutos,

$1/3.600$

íngulos muito pedeçados, os científicos ainda, cada órbita avançava apenas centro da órbita. E, o que é mais órbita de Mercúrio e meses elíptica órbitas com um desvio da órbita de Mercúrio.



estiver plenamente convencida de que a nova idéia de fato funciona. Em outras palavras, o ônus da prova sempre fica com os advogados da nova teoria. A barreira emocional contra a aceitação é igualmente alta. Os velhos cientistas, que tinham passado suas vidas acreditando em Newton, estavam naturalmente relutantes em descartar aquilo que conheciam e em que confiavam em troca de alguma teoria recém-chegada. Mark Twain fez uma observação perspicaz ao dizer: "Um cientista jamais mostra afeição por uma teoria que ele mesmo não tenha apresentado".

Não surpreende que a comunidade científica se agarrasse à visão de que a fórmula de Newton estava certa e de que os astrônomos cedo ou tarde descobririam algum novo corpo celeste que explicaria o desvio orbital de Mercúrio. Quando uma observação mais precisa não revelou nenhum sinal de um cinturão de asteróides interior, ou de uma lua ou planeta, os astrônomos então ofereceram outra solução para salvar a agonizante teoria de Newton. Fazendo uma pequena mudança na equação de Newton de  $r^2$  para  $r^{2,00000016}$ , eles poderiam de certa forma salvar a abordagem clássica e explicar a órbita de Mercúrio:

$$F = \frac{G \times m_1 \times m_2}{r^{2,00000016}}$$

Isso contudo era apenas um truque matemático. Sem respaldo na física, trataba-se de um esforço desesperado para salvar a teoria da gravidade de Newton. De fato, tais manipulações eram um sinal do tipo de lógica desligada da realidade que antes levara Ptolomeu a acrescentar mais círculos à visão equivocada do universo centrado na Terra e cheio de epiciclos.

equívocada do universo central. Se ia superar esse conservadorismo, vencer seus críticos e depor Newton, Einstein tinha que reunir mais provas a favor de sua teoria. Precisava encontrar outro fenômeno que pudesse ser explicado apenas pela sua teoria e não pela de Newton. Alguma coisa tão extraordinária que fornecesse uma prova irrefutável e inequívoca a favor da gravidade de Einstein, da relatividade geral e do espaço-tempo.

Se uma nova teoria científica testes críticos. Primeiros correspondam a todas as teorias gravitacional de Einstein coisas tinha indicado exatamente a posição do Mercúrio. O segundo teste prever os resultados de observações que os cientistas fizerem essas observações, então esta será uma prova decisiva. Quando Kepler e Galileu guiaram passar rapidamente teóricos que correspondem a essas observações. Contudo, o segundo teste das fases de Vênus correu há décadas.

O motivo pelo qual convencer os incrédulos é gerar o resultado certo. (ela concorde com o resultado. Imagine que você está pensando em Alice. Ambos afirmam ter Bob tenta convencê-lo de que o mercado de ontem, e as cotações com perfeição. o mercado amanhã. E 2º Com quem você vai investir é claro, a suspeita de que lhe são resultados do dia anterior. A teoria não é inteiramente correta no comportamento do mercado, mas é realmente.

O motivo pelo qual o primeiro teste sózinho não é suficiente para confirmar os incrédulos é o medo de que a teoria tenha sido ajustada para gerar o resultado certo. Contudo, é impossível ajustar uma teoria para que ela concorde com o resultado de uma observação que ainda não foi feita. Imagine que você está pensando em investir seu dinheiro com Bob ou com Alice. Ambos afirmam ter sistemas preferenciais para jogar no mercado de ações. Bob tenta convence-lo de que a sua teoria é melhor mostrando as categorias de ações que ele recomenda, e então revela como a sua teoria prevista aquelas categorias com preferência. Alice, por outro lado, mostra suas previsões para o mercado amanhã. E 24 horas depois fica provado que ela estava certa. Com quem você vai investir seu dinheiro, com Bob ou com Alice? Existe, é claro, a suspeita de que Bob possa ter ajustado sua teoria para corresponder aos resultados do dia anterior, depois de o pregaço terminar. Assim sua teoria não é inteiramente convincente. Mas a teoria de Alice, ao prever o comportamento do mercado de ações com antecedência, parece convincente.

Se uma nova teoria científica quiser ser levada a sério, precisa passar por dois testes críticos. Primeiro, precisa produzir resultados teóricos que correspondam a todos os observáveis existentes da realidade. A teoria gravitacional de Einstein tinha passado por esse teste, porque entre outras coisas tinha indicado exatamente a quantidade certa de desvio na órbita de Mercúrio. Segundo teste, que é ainda mais rigoroso, é de que a teoria deve prever os resultados de observações que ainda não foram feitas. Quando os cientistas fizem essas observações, se elas correspondem às previsões teóriticas, então esta seria uma evidência determinante de que a teoria é correta. Quando Kepler e Galileu afirmaram que a Terra orbitava o Sol, elas conseguiram passar rapidamente no primeiro teste, que era produzir resultados teóricos que correspondem aos movimentos conhecidos dos planetas. Contudo, o segundo teste só foi encedido quando as observações de Galileu das fases de Vênus correspondiam à previsão teórica feita por Copérnico.

## A parceria decisiva Teórica e experiênciia

De modo semelhante, se Einstein ia provar que estava certo e que Newton estava errado, ele teria que usar sua teoria para fazer uma previsão firme sobre um fenômeno ainda não observado. É claro que este fenômeno teria que acontecer num ambiente de gravidade extrema, de outro modo as previsões newtonianas e einsteinianas coincidiriam e não haveria vencedor.

No final, o teste decisivo seria um fenômeno envolvendo o comportamento da luz. Antes mesmo de aplicar sua teoria a Mercúrio — de fato, mesmo antes de terminar o desenvolvimento de sua teoria da relatividade geral —, Einstein tinha começado a explorar a interação entre a luz e a gravidade. De acordo com a sua formulação da gravidade no espaço-tempo, qualquer raio de luz que passasse por uma estrela ou um planeta maciço seria atraído pela força gravitacional em direção a essa estrela ou a esse planeta, e a luz seria levemente desviada de sua trajetória original. A teoria da gravidade de Newton também previa que objetos pesados poderiam curvar a luz, mas numa extensão menor. Conseqüentemente, se alguém pudesse medir o desvio da luz por um corpo celeste maciço, o resultado, se o desvio era pequeno ou muito pequeno, determinaria quem estava certo, Einstein ou Newton.

Já em 1912, Einstein começara uma colaboração com Erwin Freundlich sobre como fazer a medida crucial. Enquanto Einstein era físico teórico, Freundlich era um astrônomo profissional e portanto se encontrava em posição melhor para dizer como alguém poderia fazer observações que detectassem o desvio óptico previsto pela relatividade geral. Inicialmente, eles se perguntaram se Júpiter, o planeta mais denso do Sistema Solar, poderia ser grande o suficiente para curvar a luz de uma estrela distante, como mostrado na figura 25. Mas, quando Einstein fez os cálculos, usando sua fórmula, ficou claro que o desvio causado por Júpiter seria muito tênué para ser detectado, ainda que o planeta tenha trezentas vezes a massa da Terra. Einstein escreveu para Freundlich: “Se ao menos a natureza nos desse um planeta maior do que Júpiter!”

Em seguida eles se voltaram para o Sol, que é mil vezes mais denso do que Júpiter. Dessa vez os cálculos de Einstein mostraram que a atração gravitacional do Sol teria uma influência significativa sobre um raio de luz de uma estrela distante e que a curvatura da luz seria detectável. Por exem-



Figura 25 Einstein estava in um planeta maciço o sufici espaço-tempo. O diagrama cruza o espaço. A trajetória plano se Júpiter não estives pela torção espacial de Júpiter é muito pequeno pa

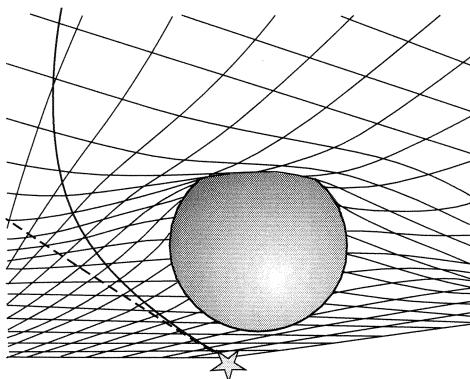
plo, se a estrela estivesse linha de visão, nós não c 26. Contudo, a imensa tempo desviariam a luz estrela, que ainda estari desvio da posição real p para indicar quem esta desvio ainda menor que

Mas há um problema a aparecer bem n mendo brilho do Sol. De de estrelas, mas todas pe comparado ao do Sol. C do Sol se revelam. Em que eles procurassem pe

Mas há um problema: uma estrela cuja luz fosse desviada pelo Sol de modo a aprecer bem na sua beira daria seria impossível de ver devido ao tremendo brilho do Sol. De fato, a região em torno do Sol está sempre salpicada de estrelas, mas todas permanecem invisíveis porquê seu brilho é desprezível comparado ao do Sol. Contudo, existe uma ocasião em que as estrelas alem do Sol se revelam. Em 1913, Einstein escreveu para Freudlich sugerindo que elas procurassem pelos desvios estelares durante um eclipse total do Sol.

Logo, se a estrela estivesse por trás da borda do Sol, portanto fora da nossa linda de visão, nós não deveríamos vê-la da Terra, como mostrado na figura 26. Contudo, a imensa força gravitacional do Sol e a torção do espaço-tempo desviariam a luz da estrela na direção da Terra, tornando-a visível. A estrela, que ainda estaria atrás do Sol, pareceria estar bem ao seu lado. O desvio da posigão real para a aparente seria muito pequeno, mas o suficiente para indicar que um estrela certa, produz a formula de Newton previa um desvio ainda menor que o da fórmula de Einstein.

**Figura 25** Einstein estaria intercessado na possibilidade de produzir uma curvatura da luz das estrelas por Júpiter, um planeta maciço o suficiente para possuir uma concentração de massa suficiente para produzir uma curvatura da luz das estrelas por Júpiter, um espaço-tempo. O diagrama mostra uma estrela distante emitindo um raião de luz que caiu para o espaço-tempo. A trajetória reta mostra como a luz teria se deslocado através do espaço-tempo se Júpiter não estivesse presente. A trajetória curva mostra como a luz se desviada pela torção espacial de Júpiter. Infelizmente para Einstein, o desvio da luz estrelar por plâano se Júpiter não estivesse presente.



TEORIAS DO UNIVERSO 129

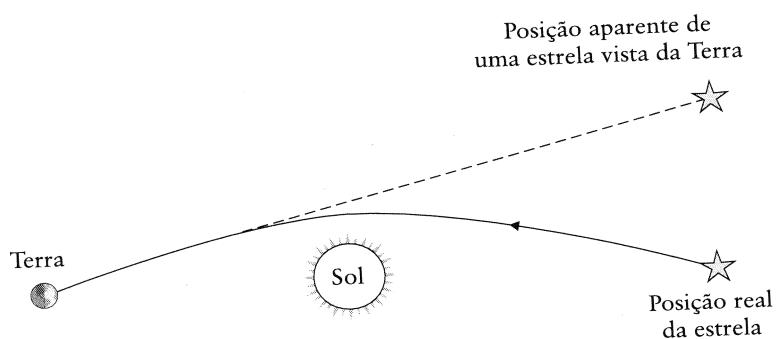


Figura 26 Einstein esperava que a curvatura da luz estelar pelo Sol pudesse ser usada para comprovar sua teoria da relatividade geral. A linha de mira entre a Terra e a estrela distante é bloqueada pelo Sol, mas a massa do Sol distorce o espaço-tempo e a luz estelar é desviada para seguir uma trajetória curva em direção à Terra. Nosso instinto nos diz que a luz viaja em linha reta, assim, da Terra, nós projetamos a trajetória da luz de volta que a luz viaja em linha reta, assim, da Terra, nós projetamos a trajetória da luz de volta ao longo da linha reta que ela deve ter percorrido e parece que a estrela mudou de posição. A teoria da gravidade de Einstein previa um desvio estelar aparente maior do que o previsto pela teoria da gravidade de Newton, assim, a medição do desvio indicaria qual teoria da gravidade era a correta.

Quando a Lua tampa o Sol durante um eclipse, o dia temporariamente se transforma em noite e as estrelas aparecem. O disco da Lua se encaixa sobre o do Sol tão perfeitamente que é possível identificar uma estrela a apenas uma fração de grau da borda do Sol — ou melhor, uma estrela cuja luz foi desviada de modo que ela *parece* estar uma fração de grau fora do disco solar.

Einstein esperava que Freundlich pudesse examinar fotografias de eclipses passados para encontrar as mudanças nas posições necessárias que provassem sua fórmula da gravidade, mas logo ficou claro que dados de segunda mão não seriam suficientes. A exposição e o enquadramento das fotos teriam que ser perfeitos para detectar pequenas mudanças nas posições das estrelas, e as fotografias de eclipses passados não correspondiam às expectativas.

Havia apenas uma opção. Freundlich teria que montar uma expedição para fotografar o próximo eclipse solar, que seria observável da Criméia em 21 de agosto de 1914. A reputação de Einstein dependia dessa observação,

por isso ele estava preocupado. Ficou tão obcecado com o trabalho que fez cálculos com o parceiro que erros. Mais tarde, a viúva de Freundlich, já que elas teriam vidas diferentes.

Freundlich partiu de Berlim para a Criméia. Sabemos agora que foi um erro. Ferdinand tinha eventos que levariam à morte. Freundlich chegou à Rússia com seus telescópios para o Reino Unido. Alemanha tinha declarado guerra à Rússia. Alemães carregando telescópios para a Rússia. Naquela ocasião estavam presentes e sua equipe tinha sido capturada. As coisas, eles foram libertados, mas um fracasso completo. Um grupo de oficiais alemães carregando telescópios para a Rússia. Berlim, no dia 2 de setembro de 1914.

Essa iniciativa maluca para examinar o avanço na física e a pura parada, já que toda a Alemanha, e muitas das jovens como voluntários para que já era um nome familiar, fazendo parte de uma das maiores potências mundiais. Um navio para a Grécia, aliadas que atacavam o Egito, condições em Galípoli: mosquitos, mas moscas na comida". Ao alvorecer, os turcos iniciaram um ataque que



toda a guerra. Quando o assalto terminou, Moseley estava morto. Até mesmo a imprensa alemã lamentou sua morte, classificando-a como “uma perda cruel” (*ein schwerer Verlust*) para a ciência.

De modo semelhante, Karl Schwarzschild, diretor do Observatório de Potsdam, na Alemanha, também se ofereceu para lutar por seu país. Ele continuou a escrever trabalhos científicos enquanto estava preso nas trincheiras, incluindo um sobre a teoria da relatividade geral de Einstein, que mais tarde levou à compreensão dos buracos negros. No dia 24 de fevereiro de 1916, Einstein apresentou o trabalho à Academia Prussiana. E quatro meses depois Schwarzschild estava morto. Tinha contraído uma doença fatal na frente oriental.

Enquanto Schwarzschild se apresentava para lutar, seu equivalente no Observatório de Cambridge, Arthur Eddington, recusou-se a se alistar, com base em princípios religiosos. Educado como um quacre devoto, Eddington deixou clara sua posição: “Minha objeção à guerra é baseada em princípios religiosos... Mesmo se a abstenção dos opositores conscientes fizer a diferença entre a vitória ou a derrota, nós não podemos verdadeiramente beneficiar a nação com a desobediência obstinada à vontade divina”. Os colegas de Eddington apelaram para que ele fosse excluído do serviço militar com o argumento de que ele era mais valioso para o país como cientista, mas o Ministério do Interior rejeitou a petição. Parecia inevitável que a postura de Eddington como opositor consciente o levaria para um campo de prisioneiros.

Então Frank Dyson, o astrônomo real, veio salvá-lo. Dyson sabia que haveria um eclipse total do Sol no dia 29 de maio de 1919, e que aconteceria junto a um rico aglomerado de estrelas conhecido como as Híades — um excelente cenário para medir qualquer desvio gravitacional da luz. A trilha do eclipse cruzava a América do Sul e a África Central, de modo que fazer as observações implicaria montar uma grande expedição aos trópicos. Dyson sugeriu ao almirantado que Eddington poderia servir ao seu país organizando e liderando tal expedição, e, enquanto isso, ele deveria permanecer em Cambridge para prepará-la. Dyson apelou para o patriotismo, sugerindo que era dever de um cidadão inglês defender a gravidade de Newton contra a teoria germânica da relatividade geral. Em seu coração e em sua mente, Dyson

era pró-Einstein, mas ele era ridades. Sua campanha de Eddington recebeu permissão, preparando tudo para o ecl

De fato, Eddington era Einstein. Ele passara toda a sua vida, desde a idade de quatro anos, a observar o céu. Tornou-se um aluno da Universidade de Cambridge com a maior distinção. E manteve essa distinção entre os colegas. Como pesquisou a relatividade geral, e no deviamente, que Einstein elogia “qualquer idioma”. Eddington era amigo de Ludwig Silberstein, que também era um grande pesquisador da relatividade geral, uma vez que disse para pessoas no mundo que com ele olhando em silêncio, até que “Pelo contrário”, respondeu a terceira pessoa.

Além de ser intelectual, para liderar uma expedição sobreviver aos rigores de um as expedições astronômicas levam os cientistas aos seus locais. O cientista francês Jean d'Auteroche observou o planeta Vênus em 1761, ele foi para a Sibéria porque a população local a tinha apontado para o Sol e a primavera, que tinham acontecido, suas observações do território, mas a febre matou d'Auteroche deixando apenas um sobrevivente.

Além de ser intelectualmente bem dotado e possuir a confiança necessária para lidar com a expedição, Edmigton também era forte o bastante para sobreviver aos rigores de uma aventureira tropical. Isto era importante, porque as expedições astronómicas têm a reputação de serem jornadas arduas que levam os cientistas aos seus limites. No final do século XVIII, por exemplo, o cientista francês Jean d'Auterroche participou de duas expedições para observar o planeta Vénus passando sobre a face do Sol. Na primeira, em 1761, ele foi para a Sibéria, onde teve que ser protegido pelos cossacos, porque a população local achava que os estranhos equipamentos que ele trinha apontado para o Sol eram responsáveis pelas severas inundações da primavera, que tinham acontecido recentemente. Oito anos depois, ele repetiu suas observações do trânsito de Vénus na península Baja, no México, mas a febre matou d'Auterroche e dois membros de sua equipe logo depois, deixando apenas um sobrevivente para levar as preciosas medalhas para Paris.

De fato, Eddington era o homem perfeito para verificar a teoria de Einstein. Ele passara toda a vida fascinado pela matemática e pela astronomia, desde a idade de quatro anos, quando tentara contar todos os estrelas do céu. Tornou-se um aluno brilhante, ganhando uma bolsa de estudos na Universidade de Cambridge, onde foi o melhor aluno do ano, recebendo a mais alta distinção. Como pesquisador, ficou bem conhecido como defensor das teorias da relatividade geral, e no tempo escreveria *A teoria matemática da relatividade*, que Einstein elogiaria como "a melhor apresentação do assunto em quaisquer idiomas". Eddington ficou tão associado com a teoria que o físico Ludwig Silberstein, que também se considerava uma autoridade em relatividade geral, uma vez disse para Eddington: "O senhor deve ser uma das três pessoas no mundo que compreendem a relatividade geral". Eddington ficou solhando em silêncio, até que Silberstein lhe disse para não ser tão modesto. "Pelo contrário", respondeu Eddington. "Estou tentando lembrar quem é a

esperando tudo para a ecclise de 1919. Eddington recebeu permissão para continuar trabalhando no observatório, riadres. Sua campanha deu certo. A amega de prisão foi esquacida e

Outras expedições eram menos perigosas para o corpo, porém mais exaustivas para a mente. Guillaume le Gentil, um dos colegas de D'Auteroche, também tinha planejado observar o trânsito de Vênus em 1761, mas viajou para Pondicherry, na Índia francesa, para testemunhar o evento. Quando chegou lá, os britânicos estavam em guerra contra os franceses, Pondicherry estava sitiada e Le Gentil não pôde desembarcar na Índia. Ele decidiu então se estabelecer em Maurício e ganhar a vida como comerciante enquanto esperava oito anos pelo trânsito de 1769. Desta vez ele conseguiu chegar a Pondicherry e desfrutou semanas de gloriosa luz solar nos dias anteriores ao trânsito, apenas para as nuvens aparecerem no momento crucial, obscurecendo completamente a visão. "Passei mais de duas semanas num estado de depressão", escreveu, "e quase não tinha coragem de pegar na pena para continuar meu diário. Várias vezes esta caiu de minhas mãos quando chegou a hora de relatar à França o destino de minha empreitada." Depois de uma ausência de 11 anos, seis meses e 13 dias, ele retornou para sua casa, na França, e descobriu que ela tinha sido saqueada. Mas conseguiu reconstruir sua vida escrevendo suas memórias, que se tornaram um grande sucesso comercial.

No dia 8 de março de 1919, Eddington e sua equipe deixaram Liverpool a bordo do HMS *Anselm* e se dirigiram para a ilha da Madeira, onde os cientistas se dividiram em dois grupos. Um grupo permaneceu a bordo do *Anselm* e viajou para o Brasil a fim de observar o eclipse em Sobral, no Ceará. Eddington e o segundo grupo embarcaram no cargueiro *Portugal* e foram para a ilha de Príncipe, em frente à costa da Guiné Equatorial, na África Ocidental. A idéia era de que, se as nuvens escondessem o eclipse no Brasil, talvez a equipe africana tivesse sorte, ou vice-versa. O clima decidiria o resultado das expedições, e assim ambas as equipes começaram a procurar um lugar ideal para a observação assim que chegaram aos seus destinos. Eddington usou um dos primeiros veículos com tração nas quatro rodas para explorar Príncipe, e afinal decidiu instalar seus equipamentos em Roca Sundy, um local elevado no noroeste da ilha, que parecia menos propenso ao céu nublado. Então a equipe passou a testar chapas fotográficas e a verificar equipamentos, garantindo que tudo estivesse perfeito para o grande dia.

As observações do e vez a luz das estrelas fo da gravidade de Newton mais significativo de ac dos discordassem de am estariam errados.

Einstein previa que a viada de 1,74 segundos das tolerâncias do equipamento por Newton. Esse desvio de um quilômetro, mov

À medida que o dia maram-se sobre Sobral, de observação de Eddington da Lua tocar a borda da condição de observação. Eddington registrou o que "A chuva cessou por volta quando a fase parcial d lumbrar o Sol e tivemos da fé. Eu nem vi o eclipse fotográficas. Só dei uma outra espiada no meio

A equipe de observaram montadas, expostas a condições de segundo. Eddington meia-luz que tomara conta pelos chamados dos observadores 302 segundos de totalic

Das 16 fotografias tiradas por fiapos de nuvens no momento de céu claro fôrtil. Em seu livro *Esp* aconteceu com esta pre

Das 16 fotografias tiradas pela equipa de Principe, a maioria foi estragada por fios de nuvens obscurecendo as estrelas. De fato, durante o breve momento de céu claro foi possível tirar algumas fotosgrafia de valor científico. Em seu livro *Espagu, tempo e gravidade*, Eddington descreveu o que aconteceu com esta preciosas fotografias:

A medida que o dia do eclipse se aproxima, níveis ameaçadores for- maram-se sobre Sobral e Princípio, seguidas por chuvas e trovoadas. No sítio de observação de Edmington, a tempestade passou uma hora antes de o disco da Lua tocar a borda do Sol, mas o céu ainda permanecia enevoado e as condições de observação estavam longe do ideal. A missão corría perigo. Edmington registrou o que aconteceu em seguida no seu livro de anotações: „A chuva cessou por volta do meio-dia e por volta de meia da tarde, quando a fase parcial do eclipse já estava bem avançada, começamos a vis- lumar o Sol e tivemos que realizar nosso programa de fotografias na base da fe. Eu nem vi o eclipse, estava ocupado demais trocando as chapas fo- tográficas. Se dei uma olhada para me certificar de que tinha comegado, e lá fui eu para a base.“

Em seu extremo, previa que uma estrela que aparecesse na borda do Sol seria des-  
viada de 1,74 segundos de arco ( $0,0005''$ ), o que estava extremamente dentro das  
tolerâncias do equipamento de Eddington e era duas vezes o desvio previsto  
por Newton. Esse desvio angular era equivalente a uma vela, a uma distância  
de um quilômetro, movendo-se para a esquerda apenas um centímetro.

As observações do eclipse poderiam levar a três resultados possíveis. Talvez a luz das estrelas fosse apena leveamente desviada, como previa a teoria da gravidade de Newton. Ou, como Einstein esperava, haveria um desvio mais significativo de acordo com a relatividade geral. Ou talvez os resultados discordassem de ambas as teorias, o que implicaria que Einstein e Newton